

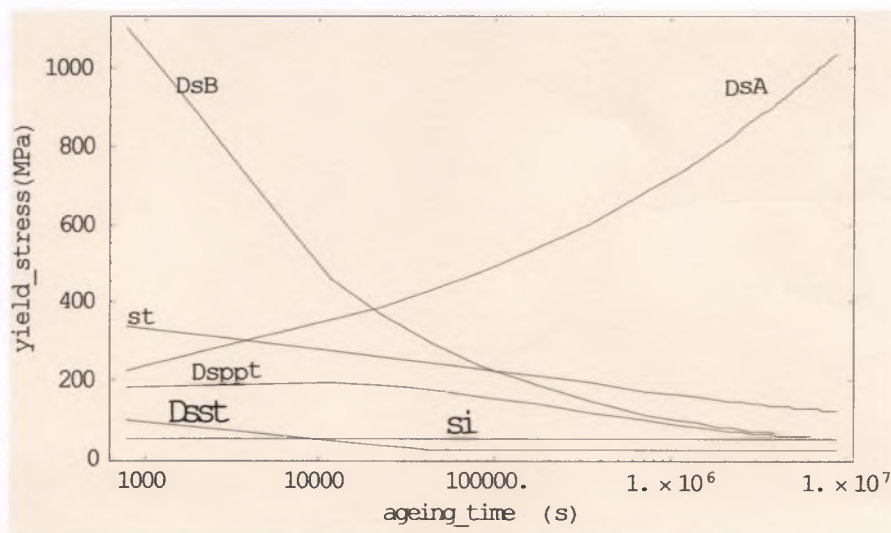
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ  
ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΚΑΘΙΖΗΣΗ »**

υπό

**ΣΜΑΡΑΓΔΑ Ι. ΖΥΓΡΙΔΟΥ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας  
2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6686/1  
Ημερ. Εισ.: 06-11-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2008  
ΖΥΓ

© 2008 Ζυγρίδου Σμαράγδα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθώς και για τη συνεργασία που είχα μαζί του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης οφείλω ευχαριστίες στον Καθηγητή κ.Γ.Μπρέγιαννη, για την πολύτιμη βοήθειά του στον προγραμματισμό με Mathematica καθώς και την κ.Ελένη Καμούτση, για τη βοήθειά της κατά τη μεταλλογραφία και την κοκκομετρία που ανέπτυξα στο κεφάλαιο 4.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που αγαπώ και μ'αγαπούν κι αυτοί, κάνοντας την ευχή να υπάρχουν πάντα στη ζωή μου.. Ενώ ακόμη εύχομαι η διπλωματική αυτή εργασία, που σφραγίζει τα φοιτητικά μου χρόνια στο Βόλο, καθώς και το πτυχίο του μηχανολόγου μηχανικού, να'ναι δυνατά εφόδια για τη μετέπειτα καριέρα μου.

Σμαράγδα Ι. Ζυγρίδου

# **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΚΑΘΙΖΗΣΗ**

**ΣΜΑΡΑΓΔΑ Ι. ΖΥΓΡΙΔΟΥ**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **Περίληψη**

Τα κράματα αλουμινίου ισχυροποιημένα με καθίζηση, η σπονδυλική στήλη της βιομηχανίας αεροσκαφών, υπήρξαν το αντικείμενο πολυάριθμων επιστημονικών μελετών. Σ' αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια να εφαρμόσουμε ένα μοντέλο για την εύρεση του ορίου ροής των παραπάνω κραμάτων. Αρχικά παρουσιάζουμε το άρθρο στο οποίο βασίστηκε η μοντελοποίηση μας, όπου υπάρχουν όλες οι συνιστώσες, λόγω θερμοδυναμικής και κινητικής, που αποτελούν το μοντέλο. Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα μοντέλο με χρήση του Mathematica. Τέλος εφαρμόζουμε το μοντέλο, εξάγουμε έναν αριθμό διαγραμμάτων τα οποία στη συνέχεια συγκρίνουμε με αυτά του άρθρου και κάνουμε μία προσπάθεια βελτίωσης του μοντέλου.

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>2</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
2.2 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ.....	2
2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ[3].....	5
2.3.1 ΓΗΡΑΝΣΗ.....	6
2.3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΘΙΖΗΣΗ....	10
2.3.3 ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΣΥΝΟΡΑ ΚΟΚΚΩΝ.....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΡΘΡΟ ASHBY.....</b>	<b>16</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
3.2 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ.....	16
3.3 ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	17
3.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΣΕ ΚΡΑΜΑ 6061.....	19
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΑΛΛΑ ΚΡΑΜΑΤΑ.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>	<b>25</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
4.2 ΑΡΧΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	25
4.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΡΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΟΚΚΩΝ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ.....	27
4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	28
4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
4.4.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ.....	29
4.4.3 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>32</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	32
5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΡΘΡΟ ASHBY.....	32
5.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	38
5.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΡΟΗΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΩΝ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ.....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &amp; ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ     ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>45</b>
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	45
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	46

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α_ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....</b>	<b>47</b>
<b>(a) ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASHBY.....</b>	<b>47</b>
<b>(b) ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ MATHEMATICA.....</b>	<b>48</b>
<b>(c) ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ         ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ.....</b>	<b>50</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β_ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ MATHEMATICA.....</b>	<b>51</b>
<b>(a) ΑΡΧΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ MATHEMATICA         (ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΑΡΘΡΟ ASHBY).....</b>	<b>51</b>
<b>(b) ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ MATHEMATICA ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΤΩΝ         ΣΥΝΟΡΩΝ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>	<b>60</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ_ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 6061ΕΛΑΤΟ.....</b>	<b>62</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>68</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 3.1.</b> Δεδομένα για τις καμπύλες καθίζησης του κράματος 6061.....	<b>19</b>
<b>Πίνακας 3.2:</b> Οι αποδεκτές τιμές για τις παραμέτρους που έλαβαν μέρος κατά τη ρύθμιση των καμπύλων καθίζησης στο κράμα 6082.....	<b>23</b>
<b>Πίνακας 4.1.</b> Ονομαστική συγκέντρωση (wt%) του αλουμινίου 6061...25	
<b>Πίνακας 4.2.</b> Ο μέσος όρος διαμέτρου των κόκκων των τριών δοκιμίων καθώς και ο συνολικός τους μέσος όρος σε $\mu\text{m}$ .....	<b>31</b>
<b>Πίνακας 5.1</b> Οι διαφορετικές τιμές ορισμένων παραμέτρων στον κώδικά μας σε σχέση με αυτών του άρθρου.....	<b>32</b>



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1.</b> Τμήμα του διαγράμματος φάσεων του συστήματος Al-Cu με τις καμπύλες solvus των ζωνών GP και των φάσεων θ'', θ' και θ.....	7
<b>Σχήμα 2.2.</b> Μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4% Cu με το χρόνο γηράνσεως για δύο θερμοκρασίες γηράνσεως, 120 και 180°C.....	10
<b>Σχήμα 2.3.</b> Υπέρβαση μη-διαπερατών σωματιδίων από μια αταξία με το μηχανισμό Orowan.....	12
<b>Σχήμα 2.4.</b> Υπέρβαση μη-διαπερατών σωματιδίων από μια αταξία με το μηχανισμό Orowan.....	12
<b>Σχήμα 2.5.</b> Καμπύλες τάσεως-παραμορφώσεως του κράματος Al-4%Cu για διάφορους χρόνους γηράνσεως στους 180°C.....	13
<b>Σχήμα 2.6.</b> (α)Εκπομπή αταξιών από την πηγή Frank-Reed(FR), (β) ο σχηματισμός ουράς αταξιών με αντίστοιχη συγκέντρωση τάσεως, (γ)ενεργοποίηση πηγής Frank-Reed(FR2) στον κόκκο 2 από την ουρά αταξιών του κόκκου 1.....	14
<b>Σχήμα 2.7.</b> Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή $k_y$ στη σχέση Hall-Petch...	15
<b>Σχήμα 3.1:</b> Διάγραμμα ορίου ροής ως προς το χρόνο καθίζησης.....	18
<b>Σχήμα 3.2.a :</b> Διάγραμμα $\log_e \left( \frac{tp}{T} \right) \leftrightarrow \frac{1}{T}$ .....	20
<b>Σχήμα 3.2.b :</b> Το πρώτο πλοτάρισμα μεταξύ της $S_o^2$ και της θερμοκρασίας T.....	20
<b>Σχήμα 3.2.c :</b> Το τελευταίο πλοτάρισμα των $S_o^2$ και της θερμοκρασίας T.....	21
<b>Σχήμα 3.3.a,b:</b> Διαγράμματα ορίων ροής του κράματος 6061 από το άρθρο Ashby.....	22,35
<b>Σχήμα 3.4</b> Διαγράμματα του κράματος 6082 για 9 θερμοκρασίες καθίζησης.....	23
<b>Σχήμα 5.1</b> (α) $\sigma_i$ , Όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης, (β) $\Delta\sigma_{ss}$ , Αύξηση ορίου ροής λόγω στερεού διαλύματος, (γ) $\Delta\sigma_A$ , Ισχυροποίηση συνοχής, (δ) $\Delta\sigma_B$ , Ισχυροποίηση Orowan, (ε) $\Delta\sigma_{ppt}$ , Αύξηση ορίου ροής λόγω καθίζησης στο πλέγμα, (ζ) $\sigma(t)$ , όριο ροής του κράματος, (η) Διάγραμμα με όλες τις καμπύλες που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος, (θ) Τα δεδομένα ζεύγη( $\sigma,t$ ), (ι) Διάγραμμα με τα δεδομένα ζεύγη ( $\sigma,t$ ) και το όριο ροής $\sigma(t)$ του κράματος [για θερμοκρασία καθίζησης $T=191^\circ C$ ].....	34
<b>Σχήμα 5.2:</b> Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma,t$ ) από το Mathematica για διάφορες θερμοκρασίες καθίζησης.....	36
<b>Σχήμα 5.3</b> Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma,t$ ) για θερμοκρασίες καθίζησης $T=218,204,191,171,163,149,135^\circ C$ , έχοντας αριστερά τις τιμές $t_p$ του άρθρου και δεξιά τις τιμές που βρέθηκαν με χάρακα και στυλό.....	40

<b>Σχήμα 5.4 (α)</b> Διάγραμμα ( $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ ) ισχυροποίησης λόγω διαμέτρου των κόκκων με μικρό εύρος τιμών στον άξονα y, <b>(β)</b> Διάγραμμα ( $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ ) ισχυροποίησης λόγω διαμέτρου των κόκκων με μεγαλύτερο εύρος τιμών.....	<b>41</b>
<b>Σχήμα 5.5</b> Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma, t$ ) από το Mathematica για διάφορες θερμοκρασίες καθίζησης, έχοντας αριστερά το όριο ροής χωρίς τον όρο $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ και δεξιά το όριο ροής με $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ .....	<b>43</b>
<b>Σχήμα 5.6</b> Διάγραμμα με όλες τις καμπύλες που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος 6061, έχοντας προσθέσει τον όρο $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ [για θερμοκρασία καθίζησης $T=191^{\circ}\text{C}$ ].....	<b>44</b>
<b>Σχήμα B1.</b> Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του πρώτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.....	<b>62</b>
<b>Σχήμα B2.</b> Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του πρώτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.....	<b>62</b>
<b>Σχήμα B3.</b> Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.....	<b>63</b>
<b>Σχήμα B4.</b> Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.....	<b>63</b>
<b>Σχήμα B5.</b> Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 1000x.....	<b>64</b>
<b>Σχήμα B6.</b> Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 1000x.....	<b>64</b>
<b>Σχήμα B7.</b> Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.....	<b>65</b>
<b>Σχήμα B8.</b> Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.....	<b>65</b>
<b>Σχήμα B9.</b> Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.....	<b>66</b>
<b>Σχήμα B10.</b> Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.....	<b>66</b>
<b>Σχήμα B11.</b> Φωτογραφία3 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.....	<b>67</b>

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Με αφορμή τη συνεχή ανάγκη βελτίωσης της βιομηχανίας του αλουμινίου, εξετάζεται το άρθρο Ashby. Το άρθρο αυτό προσφέρει ένα πολλά υποσχόμενο μοντέλο, μιας και υποστηρίζεται σ' αυτό πως είναι δυνατή η εξαγωγή ισόθερμων καμπυλών ορίου ροής σε σχέση με το χρόνο  $t$ , των απλούστερων κραμάτων αλουμινίου ισχυροποιημένων με καθίζηση, κάνοντας χρήση μόνο των πειραματικών μέγιστων ορίων ροής σε κάθε θερμοκρασία καθίζησης. Η εξαγωγή τέτοιων καμπυλών θα ήταν ουσιαστικής σημασίας, καθώς θα ήταν το πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός μελλοντικού μοντέλου στο οποίο θα μπορούσε να προβλεφθεί η αντοχή νέων κραμάτων πριν τη δημιουργία τους και χωρίς να γίνεται χρήση καταστρεπτικών ελέγχων όπως αυτής της δοκιμής εφελκυσμού.

Ο στόχος της εργασίας είναι αρχικά να μελετηθούν οι μεταβολές που συμβαίνουν μέσα σ' ένα κράμα κατά τη δημιουργία του, κατανοώντας έτσι, με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής και της κινητικής, τη σύνθεση του μοντέλου που μελετάται. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή του μοντέλου με κώδικα στο πρόγραμμα Mathematica, κι εξάγονται κάποια συμπεράσματα συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μοντελοποίησής μας με αυτά του άρθρου. Τέλος γίνεται μία περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου μέσω της εισαγωγής της επιπλέον συνιστώσας ισχυροποίησης με σύνορα κόκκων και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

#### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το αλουμίνιο και η οικογένεια των κραμάτων του, είναι σήμερα μετά το σίδηρο και το χάλυβα, τα σημαντικότερα βιομηχανικά μέταλλα και η χρήση τους διαρκώς επεκτείνεται. Έτσι στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζονται οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του και οι κατηγορίες των κραμάτων, ανάλογα με τα κραματικά στοιχεία τους. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι μηχανισμοί ισχυροποίησης ενώ γίνεται εκτενής αναφορά στους μηχανισμούς ισχυροποίησης με καθίζηση και από σύνορα κόκκων.

#### **2.2 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ**

Το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης, που μετά την εξόρυξη του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με τα ηλεκτρόλυση μετατρέπεται στο τελικό μέταλλο. Η σημερινή υψηλή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Το αλουμίνιο λοιπόν έχει πυκνότητα μόνο  $2,7 \text{ gr/cm}^3$ , σχεδόν το  $1/3$  από αυτή των χαλύβων που είναι  $7,83 \text{ gr/cm}^3$ . Επίσης το αλουμίνιο και τα κράματά του, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση, αν και αντιδρούν ισχυρά με το οξυγόνο. Αυτό οφείλεται στο οξείδιο του αλουμινίου που σχηματίζεται, ένα αδιαπέραστο στρώμα στην επιφάνεια του μετάλλου και δεν επιτρέπει την περαιτέρω οξείδωση του μετάλλου. Στο οξείδιο αυτό οφείλεται και το μοναδικό ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζει το αλουμίνιο και τα κράματά του, δηλαδή τη δύσκολη συγκόλλησή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αντίθετα το αλουμίνιο και τα κράματά του προσφέρονται για όλους τους τύπους των μηχανικών κατεργασιών όπως χύτευση, κοπή, έλαση κ.ά.

Το αλουμίνιο ως υλικό συσκευασίας δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο από υγρά και αέρια και εξασφαλίζει την υγιεινή των τροφίμων όταν και όπου χρησιμοποιείται για την συσκευασία τους. Στην οικοδομή αποτελεί ένα από τα βασικά υλικά. Είναι αδιάβρωτο από καιρικούς παράγοντες και δίνει μοναδικές λύσεις στην κατασκευή μοντέρνων κτιρίων, στην ανακατασκευή, την ανακαίνιση ή συντήρηση παλαιών κτιρίων με ιστορική και αρχιτεκτονική αξία.

Επίσης το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η

επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Τα κράματα του αλουμινίου, διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Χυτά κράματα
- Ελατά κράματα

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση, προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573 και προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το κραματικό στοιχείο με τη μεγαλύτερη αναλογία. Τα κράματα γενικότερα χωρίζονται σε άλλες δύο μεγάλες κατηγορίες: τα θερμικά και μη θερμικά κατεργάσιμα. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικότερα οι ομάδες των κραμάτων της κάθε κατηγορίας.

### **Κράματα θερμικά κατεργάσιμα**

(Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία.)

**Σειρά 2000:** κράματα αλουμινίου-χαλκού. Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές όπως στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα 2017, 2024.

**Σειρά 6000:** κράματα αλουμινίου - πυριτίου –μαγνησίου. Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ. Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες.



Στην κατηγορία των κραμάτων που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικά κράματα: 6005, 6061, 6082. Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμητική συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως στις αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά κράματα: 6060, 6063.

**Σειρά 7000:** κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου. Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματικά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία.

### **Κράματα μη θερμικά κατεργάσιμα**

(Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές τους ανάλογα με το βαθμό της μηχανικής κατεργασίας που υφίστανται.)

**Σειρά 1000:** Καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα. Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.

**Σειρά 3000:** κράματα αλουμινίου – μαγγανίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι: η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004.

**Σειρά 4000:** κράματα αλουμινίου – πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

**Σειρά 5000:** κράματα αλουμινίου – μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλητικότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά

κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

Το δεύτερο ψηφίο των κραμάτων αλουμινίου δείχνει κάποιες τροποποιήσεις κραμάτων και μια στενή σχέση μεταξύ των κραμάτων, παραδείγματος χάριν το κράμα 5352 συσχετίζεται πολύ με το 5052 και το 5252 ενώ τα κράματα 7075 και 7475 διαφέρουν μόνο ελαφρώς στη σύνθεση. Το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο παίζουν σημαντικό ρόλο στη σειρά 1000 αλλά όχι στις υπόλοιπες. Στη σειρά 1000 τα τελευταία δύο ψηφία περιγράφουν την ελάχιστη καθαρότητα του αλουμινίου, για παράδειγμα το κράμα 1145 είναι περιεκτικότητας 99,45% σε αλουμίνιο, ενώ το κράμα 1200 είναι περιεκτικότητας 99,00% σε αλουμίνιο. Στις υπόλοιπες σειρές αλουμινίων το τρίτο και τέταρτο ψηφίο είναι απλοί αύξοντες αριθμοί.

Επίσης τα κράματα αλουμινίου μετά τον τετραψήφιο αριθμό συνοδεύονται από το συμβολισμό της διεργασίας που ακολουθήθηκε κατά την παραγωγή τους. Το κράμα 6061 που χρησιμοποιείται π.χ. κατά τη μοντελοποίηση είναι κράμα 6061-T6, μπορούμε όμως να το βρούμε ως 6061-O και 6061-T4.

- ❖ Το 6061-O: δείχνει ότι το κράμα είναι ανοπτημένο κι έχει υποστεί ανακρυστάλλωση.
- ❖ Το 6061-T4: δείχνει ότι στο κράμα γίνεται διαλυτοποίηση και στη συνέχεια φυσική γήρανση. Τα κράματα αυτά δεν υπόκεινται σε ψυχρή επεξεργασία μετά τη διαλυτοποίηση και οι μηχανικές τους ιδιότητες έχουν σταθεροποιηθεί με γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου.
- ❖ Το 6061-T6: δείχνει ότι στο κράμα γίνεται διαλυτοποίηση και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση. Αυτή η ομάδα κραμάτων δεν υπόκειται σε ψυχρή επεξεργασία μετά τη διαλυτοποίηση οι μηχανικές ιδιότητές του έχουν βελτιωθεί λόγω καθίζησης.

## **2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ[3]**

Η αντοχή των μετάλλων μπορεί να αυξηθεί με την παρεμπόδιση της ολισθήσεως των αταξιών. Έτσι η μελέτη των μηχανισμών ισχυροποίησης των μετάλλων αφορά στην αλληλεπίδραση μεταξύ των αταξιών και των εμποδίων.

Ως εμπόδια στην ολίσθηση των αταξιών θεωρούνται: το ίδιο το κρυσταλλικό πλέγμα, άλλες αταξίες, ξένα άτομα παρεμβολής ή αντικατάστασης, τα σύνορα των κόκκων καθώς και σωματίδια ή ιζήματα άλλων φάσεων. Έτσι σε αντιστοιχία με τα εμπόδια αυτά,

οι βασικότεροι μηχανισμοί ισχυροποίησης είναι:

- 1) Η πλεγματική αντίσταση, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλει το ίδιο το κρυσταλλικό πλέγμα στην ολίσθηση αταξιών μέσα σ' αυτό. Η πλεγματική αντίσταση λειτουργεί πάντα, ανεξάρτητα από την λειτουργία ή όχι άλλων εμποδίων.
- 2) Η εργοσκήληρυνση, που οφείλεται αφ' ενός στη ραγδαία αύξηση της πυκνότητας των αταξιών και αφ' ετέρου στην αλληλεπίδραση μεταξύ αταξιών κατά την διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Η εργοσκήληρυνση οδηγεί στην εξάρτηση του ορίου διαρροής από την παραμόρφωση.
- 3) Η ισχυροποίηση στερεού διαλύματος που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των αταξιών με άτομα παρεμβολής ή αντικατάστασης. Τα άτομα αυτά προέρχονται από την κραμάτωση και βρίσκονται διαλυμένα σε μία φάση και σχηματίζουν στερεό διάλυμα. Δε συμμετέχουν εκείνα τα άτομα, τα οποία σχηματίζουν ιζήματα ή ενδομεταλλικές ενώσεις. Η ισχυροποίηση στερεού διαλύματος οδηγεί στην εξάρτηση του ορίου διαρροής από τη χημική σύσταση ενός κράματος.
- 4) Η ισχυροποίηση από τα σύνορα των κόκκων που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν τα σύνορα των κόκκων στην ολίσθηση των αταξιών. Οδηγεί στην εξάρτηση του ορίου διαρροής από το μέγεθος των κόκκων.
- 5) Ισχυροποίηση από καθίζηση και διασπορά φάσεων και ενδομεταλλικών ενώσεων, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν σωματίδια άλλων φάσεων, τα οποία σχηματίζονται είτε από καθίζηση, είτε από μηχανική διασπορά. Οδηγεί στην εξάρτηση του ορίου διαρροής από το κλάσμα όγκου και το μέσο μέγεθος των σωματιδίων.
- 6) Σε ένα κραματικό σύστημα είναι δυνατόν να λειτουργεί ένας ή περισσότεροι από τους παραπάνω μηχανισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σύγχρονη τάση στο σχεδιασμό κραμάτων είναι η συμμετοχή περισσότερων μηχανισμών ισχυροποίησης για τη διαμόρφωση της συνολικής αντοχής του κράματος.

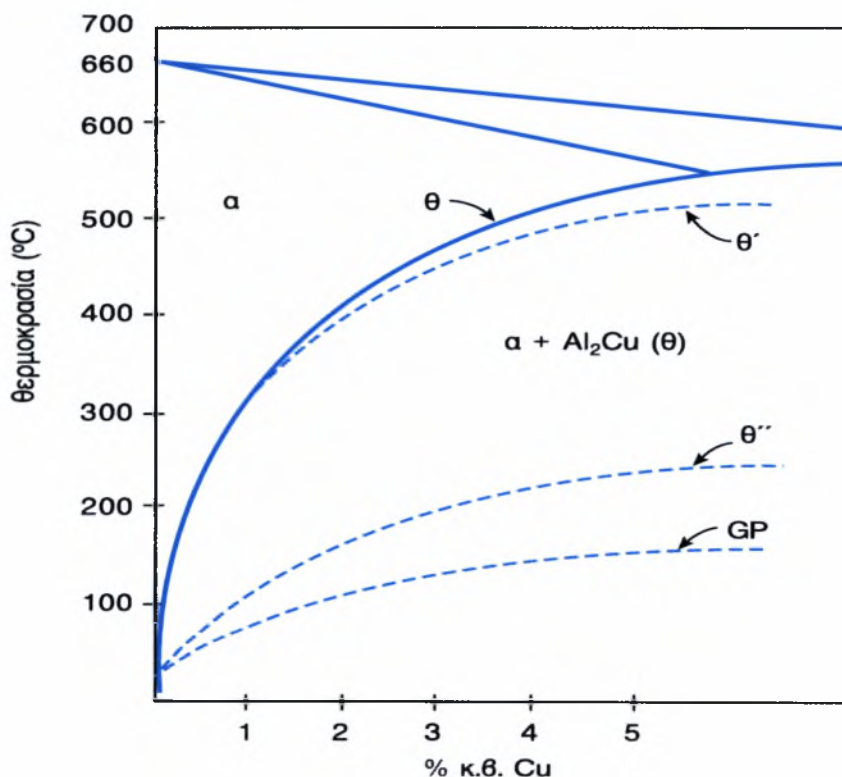
### 2.3.1 ΓΗΡΑΝΣΗ

Συγκεκριμένα για τα κράματα αλουμινίου, η ισχύροποίηση με καθίζηση είναι πολύ σημαντικός μηχανισμός. Παραδείγματος χάριν το κράμα Al-Cu ισχυροποιείται με την καθίζηση της ενδοκρυσταλλικής ένωσης  $Al_2Cu$ , η οποία ξεκινά με τη γήρανση. Το ίζημα της δεύτερης φάσεως, με τη μορφή λεπτής διασποράς σωματιδίων, εμποδίζει την ολίσθηση των αταξιών και αυξάνει την αντοχή του κράματος.



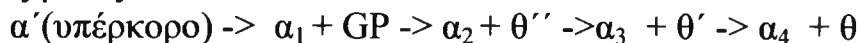
Η καθίζηση είναι διαχυτικός μετασχηματισμός φάσεων και πραγματοποιείται με πυρήνωση και ανάπτυξη. Η θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται για την καθίζηση της φάσεως  $\text{Al}_2\text{Cu}(\theta)$  αποτελείται από τρία βήματα:

- i. Θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus ( $540^\circ\text{C}$ ) για την διάλυση της φάσεως  $\theta$  και τον σχηματισμό ομογενούς στερεού διαλύματος  $\text{Al-Cu}$  (φάση  $\alpha$ ). Η κατεργασία αυτή ονομάζεται *διαλυτοποίηση*.
- ii. Απότομη ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου. Λόγω της απουσίας διαχύσεως, το στερεό διάλυμα της φάσεως  $\alpha$  παραμένει ως έχει με τη διαφορά ότι καθίσταται υπέρκορο στη θερμοκρασία δωματίου. Έτσι αναπτύσσεται μία μεγάλη κινούσα δύναμη  $\Delta G$  για την καθίζηση της φάσεως  $\theta$ . Η απότομη ψύξη ονομάζεται *βαφή*.
- iii. Θέρμανση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες. Η ενεργοποίηση της διαχύσεως σε συνδιασμό με τη μεγάλη κινούσα δύναμη προκαλεί την καθίζηση της φάσεως  $\theta$ . Η κατεργασία αυτή ονομάζεται *γήρανση*.



**Σχήμα 2.1.** Τμήμα του διαγράμματος φάσεων του συστήματος  $\text{Al-Cu}$  με τις καμπύλες solvus των ζωνών GP και των φάσεων  $\theta''$ ,  $\theta'$  και  $\theta$ .

Η σειρά καθιζήσεως είναι:



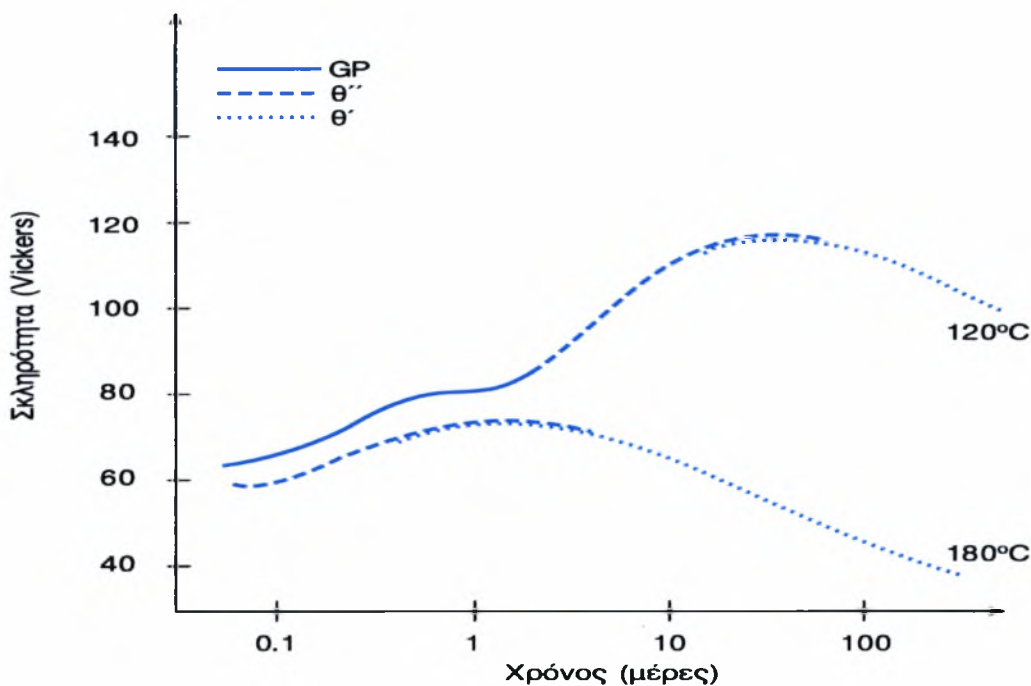
Το υπέρκορο στερεό διάλυμα  $\alpha'$  προκύπτει από τη βαφή. Στη συνέχεια, κατά τη γήρανση, σχηματίζονται πρώτα οι ζώνες GP πλούσιες

σε χαλκό που διατηρούν πλήρη συνοχή με τη μήτρα ( $\alpha_1$ ). Οι ζώνες GP ανακαλύφθηκαν και πήραν το όνομά τους το 1938 από τους Guinier και Preston. Ο λόγος που σχηματίζονται οι ζώνες GP αντί της φάσεως ισορροπίας  $\theta$  είναι η μικρή ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για την πυρήνωσή τους. Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή τιμή της διεπιφανειακής ενέργειας μεταξύ GP και της μήτρας  $\alpha_1$  αφού η διεπιφάνεια παρουσιάζει πλήρη συνοχή. Παράλληλα οι ζώνες GP σχηματίζονται με τη μορφή δίσκων ελαχιστοποιώντας έτσι την ενέργεια παραμορφώσεως. Έτσι παρά το γεγονός ότι η κινούσα δύναμη για το σχηματισμό της φάσεως  $\theta$  είναι μεγαλύτερη από εκείνη που διατίθεται για το σχηματισμό ζωνών GP, η μικρότερη ενέργεια ενεργοποίησης των τελευταίων οδηγεί τελικά στο σχηματισμό τους. Την καθίζηση των ζωνών GP ακολουθεί ο σχηματισμός μεταβατικών φάσεων των  $\theta''$  και  $\theta'$ . Όπως και οι ζώνες GP, οι  $\theta''$  και  $\theta'$  έχουν μικρότερη ενέργεια ενεργοποίησης για πυρήνωση από τη φάση ισορροπίας  $\theta$ . Διαθέτοντας μια κρυσταλλική δομή μεταξύ της μητρικής φάσεως  $\alpha$  και της φάσεως  $\theta$ , επιτυγχάνουν έναν σχετικά υψηλό βαθμό συνοχής με τη μήτρα ελαχιστοποιώντας έτσι την διεπιφανειακή ενέργεια. Αντίθετα η φάση  $\theta$  έχει μια πολύ σύνθετη κρυσταλλική δομή και σχηματίζει διεπιφάνεια μη-συνοχής με τη μήτρα. Έτσι η διεπιφανειακή ενέργεια της  $\theta$  είναι μεγάλη. Από τις δύο μεταβατικές φάσεις, η  $\theta''$  έχει πλήρη συνοχή με τη μήτρα ενώ η  $\theta'$  περιβάλλεται από διεπιφάνειες ημισυνοχής. Έτσι κατά την καθίζηση, καθώς τα σωματίδια αναπτύσσονται, η συνοχή μειώνεται. Από πλήρης που είναι στην αρχή της καθιζήσεως (ζώνες GP και  $\theta''$ ) μειώνεται σε ημισυνοχή ( $\theta'$ ) και καταλήγει σε πλήρη απώλεια συνοχής ( $\theta$ ). Η απώλεια συνοχής κατά την καθίζηση οφείλεται στην ενέργεια παραμορφώσεως που συνοδεύει τον σχηματισμό σωματιδίων μιας φάσης με πλήρη συνοχή. Η ενέργεια παραμορφώσεως αυξάνεται με το μέγεθος των σωματιδίων. Έτσι το σύστημα προτιμά να μη διατηρήσει τη συνοχή μεταξύ σωματιδίων και μήτρας για να ελαχιστοποιήσει τη συνολική ελεύθερη ενέργεια. Ολόκληρη η σειρά καθιζήσεως παρατηρείται μόνο όταν το κράμα υποστεί γήρανση σε μια θερμοκρασία κάτω από την καμπύλη solvus των ζωνών GP (Σχήμα 2.1). Εάν η γήρανση πραγματοποιηθεί πάνω από την solvus των ζωνών GP και κάτω από την solvus της  $\theta''$  τότε η καθίζηση θα ξεκινήσει με απ'ευθείας σχηματισμό της φάσεως  $\theta''$ . Η πυρήνωση των ζωνών GP, των μεταβατικών φάσεων  $\theta''$  και  $\theta'$  καθώς και της φάσεως ισορροπίας  $\theta$  είναι ετερογενής. Οι θέσεις για την πυρήνωση των ζωνών GP ομάδες οπών οι οποίες σχηματίζονται κατά τη διαλυτοποίηση και διατηρούνται μετά τη βαφή στη θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια οι ζώνες GP ενεργούν ως θέσεις πυρήνωσης για τη  $\theta''$  και γενικά η προηγούμενη φάση στη σειρά καθιζήσεως αποτελεί τη βασική θέση ετερογενούς πυρήνώσεως για την επόμενη. Η σειρά GP  $\rightarrow$   $\theta''$   $\rightarrow$   $\theta'$   $\rightarrow$   $\theta$  είναι χαρακτηριστική των

κραμάτων Al-Cu.

Οι διαφορετικές ενδιάμεσες φάσεις που σχηματίζονται κατά την καθίζηση παρουσιάζουν διαφορετική ειδική αντίσταση στην παρεμπόδιση της ολισθήσεως των αταξιών. Έτσι η αντοχή ή η σκληρότητα του κράματος εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο γηράνσεως (Σχήμα 2.2). Κατά τη γήρανση στους 120°C (κάτω από την θερμοκρασία solvus των ζωνών GP) σχηματίζονται πρώτα ζώνες GP. Λόγω της πλήρους συνοχής με τη μήτρα αναπτύσσονται παραμορφώσεις συνοχής. Η αλληλεπίδραση των αταξιών με τα τασικά πεδία των ζωνών GP οδηγεί σε ισχυροποίηση. Η σκληρότητα αυξάνει με το χρόνο γηράνσεως καθώς σχηματίζονται σωματίδια της φάσεως θ'' σε πλήρη συνοχή με τη μήτρα. Με την πάροδο του χρόνου γηράνσεως ξεκινά και η καθίζηση της φάσεως θ'. Η μέγιστη σκληρότητα είναι αποτέλεσμα συνδιασμού των φάσεων θ'' και θ'. Η θ' σχηματίζεται σε ημισυνοχή με τη μήτρα ενώ η διασπορά ταυτόχρονα αρχίζει να υφίσταται διεύρυνση. Κατά τη διεύρυνση, το μέγεθος και η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των σωματιδίων της φάσεως θ' αυξάνεται. Οι αταξίες υπερβαίνουν τα εμπόδια ευκολότερα κι έτσι η σκληρότητα μειώνεται με το χρόνο γηράνσεως. Η μείωση της σκληρότητας ονομάζεται υπεργήρανση.

Κατά τη γήρανση στους 180°C δεν σχηματίζονται ζώνες GP αφού η γήρανση πραγματοποιείται πάνω από την solvus των ζωνών GP. Αντίθετα σχηματίζονται σωματίδια της φάσεως θ'' ενώ ακολουθεί η καθίζηση σωματιδίων της φάσεως θ'. Όμως στους 180°C, ο υπερκορεσμός και επομένως η κινούσα δύναμη για την καθίζηση της φάσεως θ'' είναι μικρότερη απ'ότι στους 120°C. Έτσι σχηματίζεται μικρότερο κλάσμα όγκου της φάσεως θ'' και η μέγιστη σκληρότητα είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν που επιτυγχάνεται με γήρανση στους 120°C. Λόγω της ταχύτερης διαχύσεως στους 180°C η μέγιστη σκληρότητα επιτυγχάνεται νωρίτερα απ'ότι στους 120°C. Βλέπουμε ότι για την επίτευξη της μέγιστης σκληρότητας (αντοχής) πρέπει να εφαρμοστεί ένας βέλτιστος συνδυασμός θερμοκρασίας και χρόνου γήρανσης. Πολλές φορές εφαρμόζεται η θερμική κατεργασία της διπλής γηράνσεως κατά την οποία το κράμα υφίσταται πρώτα γήρανση σε χαμηλή θερμοκρασία για την καθίζηση ζωνών GP και στη συνέχεια υφίσταται γήρανση σε υψηλότερη θερμοκρασία για την καθίζηση της φάσεως θ'' ή της θ' χρησιμοποιώντας τις ζώνες GP ως θέσεις ετερογενούς πυρηνώσεως. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται λεπτότερη διασπορά σωματιδίων και η μέγιστη σκληρότητα επιτυγχάνεται σε συνολικά μικρότερους χρόνους γήρανσης.



**Σχήμα 2.2.** Μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4% Cu με το χρόνο γηράνσεως για δύο θερμοκρασίες γηράνσεως, 120 και 180°C.

### 2.3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΘΙΖΗΣΗ

Η συμπεριφορά της σκληρότητας με τον χρόνο γήρανσης (Σχήμα 2.2) είναι δυνατόν να εξηγηθεί εάν εξετάσουμε τους μηχανισμούς ισχυροποίησης, δηλαδή την αλληλεπίδραση των αταξιών με τις διαφορετικές φάσεις που σχηματίζονται κατά τη γήρανση. Οι ζώνες GP και τα σωματίδια της φάσεως θ'' διατηρούν πλήρη συνοχή με το κρυσταλλικό πλέγμα της μήτρας. Έτσι μια αταξία που ολισθαίνει σε ένα κρυσταλλικό επίπεδο της μήτρας μπορεί να διεισδύει και να συνεχίσει την ολίσθησή της μέσα στο σωματίδιο. Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται διαπερατά από τις αταξίες. Αντίθετα τα σωματίδια των φάσεων θ' και θ δεν παρουσιάζουν πλήρη συνοχή με τη μήτρα με αποτέλεσμα οι αταξίες να μη μπορούν να διεισδύσουν σ' αυτά. Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται μη-διαπερατά από τις αταξίες. Είναι φυσικό ο μηχανισμός ισχυροποίησης να εξαρτάται από το είδος των σωματιδίων. Λόγω των παραμορφώσεων συνοχής, τα διαπερατά σωματίδια αναπτύσσουν γύρω τους τασικά πεδία τα οποία αλληλεπιδρούν με τα αντίστοιχα τασικά πεδία των αταξιών κι έτσι παρεμποδίζουν την ολίσθησή τους. Η ισχυροποίηση που προκύπτει έχει ονομαστεί ισχυροποίηση συνοχής. Η αύξηση της αντοχής που προκύπτει είναι

$$\Delta\tau = k_1 f^{1/2} r^{1/2}$$

Όπου  $k_1$  μία σταθερά,  $f$  το κλάσμα όγκου και  $r$  το μέσο μέγεθος των σωματιδίων. Η ισχυροποίηση συνοχής είναι μία αλληλεπίδραση μεγάλης



εμβέλειας κι επομένως η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ορίου διαρροής προέρχεται κυρίως από την πλεγματική αντίσταση.

Στις ειδικές περιπτώσεις που η δομή των διαπερατών σωματιδίων είναι τακτική τότε ενεργοποιείται και μία αλληλεπίδραση μικρής εμβέλειας. Καθώς η αταξία διεισδύει στο σωματίδιο δημιουργεί ένα αντιφασικό σύνορο APB στο επίπεδο ολίσθησης. Η ενέργεια του συνόρου  $\gamma_{APB}$  είναι υψηλή με αποτέλεσμα η ισχυροποίηση που προκύπτει

να είναι σημαντική. Η αύξηση της αντοχής στην περίπτωση αυτή είναι

$$\Delta\tau = k_2 \gamma_{APB}^{3/2} f^{1/3} r^{1/2}$$

Όπου  $f$  το κλάσμα όγκου και  $r$  το μέσο μέγεθος των σωματιδίων. Όπως είπαμε η αλληλεπίδραση αυτή έχει μικρή εμβέλεια και επομένως η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ορίου διαρροής είναι ισχυρότερη.

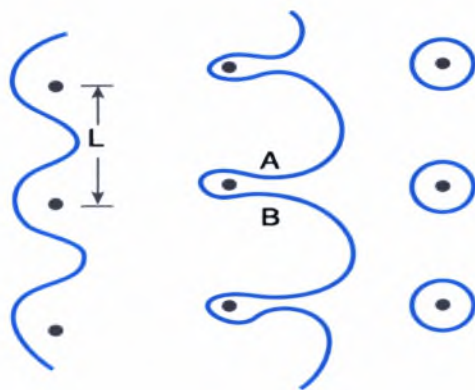
Στην περίπτωση που τα σωματίδια είναι μη-διαπερατά από τις αταξίες, η αταξία καμπυλώνεται ανάμεσα από τα σωματίδια. Έτσι ένα ζεύγος σωματιδίων λειτουργεί σαν μια πηγή Frank-Reed. Η μέγιστη τάση για να περάσει η αταξία ανάμεσα από τα σωματίδια είναι

$$\tau_{\max} = \frac{\mu b}{L}$$

όπου  $L$  η μέση απόσταση μεταξύ των σωματιδίων. Καθώς η αταξία περνά από μία σειρά σωματιδίων καμπυλώνεται αρκετά με αποτέλεσμα στα σημεία A και B τα τμήματα της αταξίας να αλληλοεξουδετερώνονται γιατί έχουν αντίθετο πρόσημο. Έτσι σχηματίζονται βρόχοι αταξιών γύρω από τα σωματίδια (Σχήμα 2.3). Αυτός ο μηχανισμός για την υπέρβαση των σωματιδίων έχει ονομαστεί Orowan. Ο σχηματισμός των βρόχων μειώνει την ελεύθερη απόσταση μεταξύ των σωματιδίων κι έτσι η απαιτούμενη τάση  $\tau_{\max}$  αυξάνεται, γεγονός που οδηγεί σε εργοσκήρυνση. Η ισχυροποίηση που προκύπτει ονομάζεται ισχυροποίηση Orowan και είναι

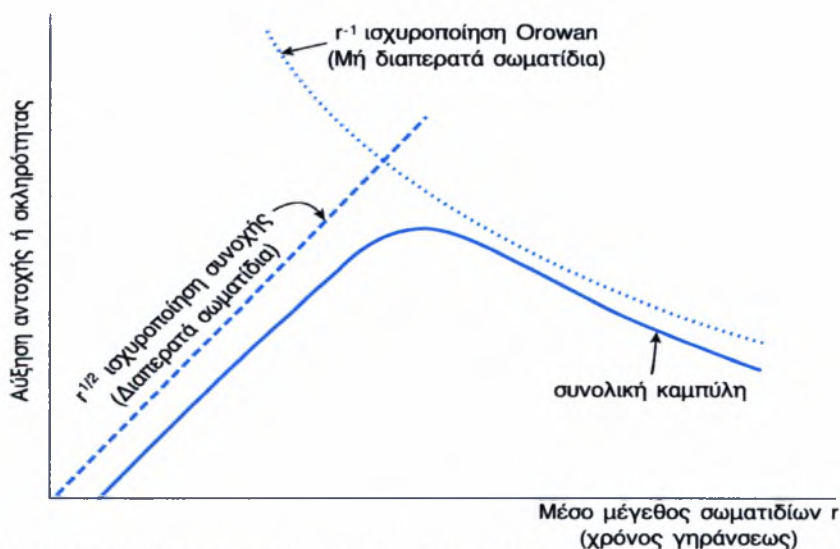
$$\Delta\tau = k_3 f^{1/2} r^{-1}$$

Όπου  $k_3$  μία σταθερά,  $f$  το κλάσμα όγκου και  $r$  το μέσο μέγεθος των σωματιδίων. Κι εδώ η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ορίου διαρροής οφείλεται κυρίως στην πλεγματική αντίσταση.



**Σχήμα 2.3.** Υπέρβαση μη-διαπερατών σωματιδίων από μια αταξία με το μηχανισμό Orowan.

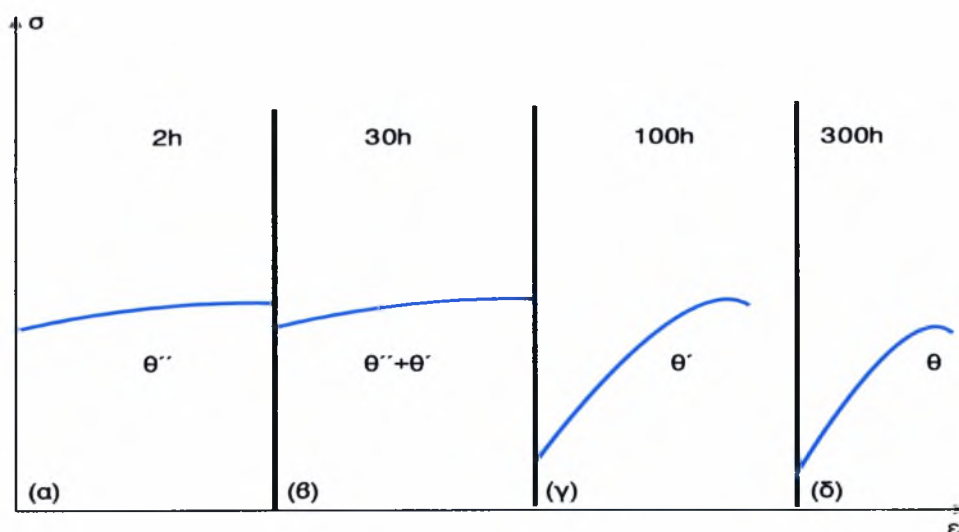
Συνοψίζοντας την εξάρτηση της ισχυροποίησης από το μέγεθος των σωματιδίων βλέπουμε ότι για τα διαπερατά σωματίδια η αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του  $r^{1/2}$  ενώ για τα μη-διαπερατά η αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του  $r^{-1}$ . Ας σημειωθεί ότι η ανάπτυξη και η διεύρυνση κατά την καθίζηση αυξάνουν το μέγεθος των σωματιδίων κατά τη γήρανση. Το Σχήμα 2.4 δείχνει την ισχυροποίηση που προκύπτει τόσο από τις ζώνες GP και τα σωματίδια  $\theta''$  (διαπερατά) όσο κι από τα σωματίδια  $\theta'$  και  $\theta$  (μη-διαπερατά). Η συνολική καμπύλη είναι όμοια με τις καμπύλες σκληρότητας του Σχήματος 2.2 και εμφανίζει μέγιστο στο σημείο αλλαγής μηχανισμού ισχυροποίησης.



**Σχήμα 2.4.** Υπέρβαση μη-διαπερατών σωματιδίων από μια αταξία με το μηχανισμό Orowan.

Η εργοσκληρυνση στα κράματα που ισχυροποιούνται με καθίζηση εξαρτάται από τους διάφορους μηχανισμούς ισχυροποίησης. Το σχήμα 2.5 δείχνει καμπύλες τάσεως-παραμορφώσεως για διάφορους χρόνους γήρανσεως στους  $180^\circ\text{C}$ . Στις περιπτώσεις (α) και (β)

η σκλήρυνση οφείλεται στην ισχυροποίηση συνοχής. Δεν εμφανίζεται μεγάλη εργοσκλήρυνση διότι δεν σχηματίζονται βρόχοι Orowan γύρω από τα σωματίδια. Αντίθετα στις περιπτώσεις (γ) και (δ) ο σχηματισμός των βρόχων Orowan οδηγεί σε σημαντική εργοσκλήρυνση.



**Σχήμα 2.5.** Καμπύλες τάσεως-παραμορφώσεως του κράματος Al-4%Cu για διάφορους χρόνους γηράνσεως στους 180°C.

### 2.3.3 ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΣΥΝΟΡΑ ΚΟΚΚΩΝ

Τα σύνορα των κόκκων παρεμποδίζουν την ολίσθηση των αταξιών αφού κατά μήκος των συνόρων αλλάζει ο προσανατολισμός των κρυσταλλικών επιπέδων κι επομένως του συστήματος ολισθήσεως από τον ένα κόκκο στον επόμενο. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην εξάρτηση του ορίου διαρροής  $\sigma_y$  από το μέγεθος των κόκκων, αφού ένα λεπτόκοκκο υλικό περιέχει περισσότερα σύνορα. Πρώτοι οι Hall και Petch καθιέρωσαν τη σχέση μεταξύ ορίου διαρροής και μεγέθους κόκκων ως

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$

όπου  $d$  η μέση διάμετρος των κόκκων,  $k_y$  ο συντελεστής Hall-Petch και  $\sigma_i$  η πλεγματική αντίσταση ή το όριο διαρροής μονοκρυστάλλου. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως σχέση Hall-Petch και ακολουθείται από πολλά μέταλλα. Ο συντελεστής Hall-Petch  $k_y$ , εκφράζει τη δυνατότητα που έχει ένα μέταλλο να ισχυροποιηθεί με μείωση του και σύμφωνα με στοιχεία που υπάρχουν, η εκλέπτυνση των κόκκων ισχυροποιεί περισσότερο τον χάλυβα απ'ότι το αλουμίνιο.

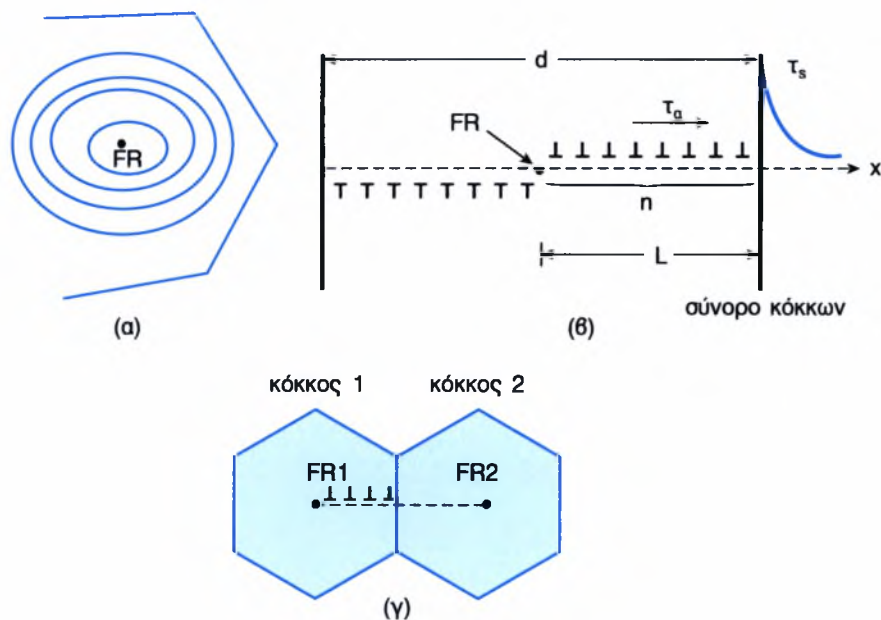
Έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες για την ερμηνεία της σχέσης Hall-Petch, εδώ όμως θα αναφερθεί η πιο αντιπροσωπευτική. Θεωρείται

ότι μια πηγή Frank-Reed στον κόκκο 1 (Σχήμα 2.6.α) εκπέμπει βρόχους αταξιών οι οποίες συσσωρεύονται σχηματίζοντας μία ουρά αταξιών. Η πρώτη αταξία της ουράς ακινητοποιείται στο σύνορο των κόκκων. Η αλληλεπίδραση των τασικών πεδίων των αταξιών ουράς οδηγεί στη συγκέντρωση τάσεως  $\tau_s$  μπροστά από την ουρά (σχήμα 2.6.β). Η τάση αυτή είναι

$$\tau_s = n \cdot \tau_a$$

όπου  $n$  ο αριθμός των αταξιών της ουράς και  $\tau_a$  η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση, που κάνει τις αταξίες να ολισθαίνουν στον κόκκο 1. Ο αριθμός των αταξιών της ουράς είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης τάσεως και του μεγέθους του κόκκου  $d$

$$n = \frac{d \tau_a}{\mu b} \pi (1 - \nu)$$



**Σχήμα 2.6.** (α) Εκπομπή αταξιών από την πηγή Frank-Reed (FR), (β) ο σχηματισμός ουράς αταξιών με αντίστοιχη συγκέντρωση τάσεως, (γ) ενεργοποίηση πηγής Frank-Reed (FR2) στον κόκκο 2 από την ουρά αταξιών του κόκκου 1.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε

$$\tau_a = \left( \frac{\mu b \tau_s}{\pi (1 - \nu)} \right)^{1/2} d^{-1/2}$$

Θεωρώντας ότι η πλαστική ροή μεταδίδεται από τον κόκκο 1 στον κόκκο 2 με την ενεργοποίηση μιας πηγής Frank-Reed στον κόκκο 2 (FR<sub>2</sub> στο Σχήμα 2.6.γ) από την  $\tau_s$  τότε μπορούμε να πούμε ότι το όριο διαρροής του πολυκρυστάλλου είναι  $\sigma_y = \tau_a M_T$  όπου  $M_T$  ο παράγοντας



Taylor. Αν συμπεριληφθεί και το όριο ροής του μονοκρυστάλλου ή την πλεγματική αντίσταση, τότε η τελευταία σχέση γίνεται

$$\sigma_y = \sigma_i + M_T \left( \frac{\mu b \tau_s}{\pi(1-\nu)} \right)^{1/2} d^{-1/2}$$

Ακόμη 
$$k_y = M_T \left( \frac{\mu b \tau_s}{\pi(1-\nu)} \right)^{1/2} d^{-1/2}$$

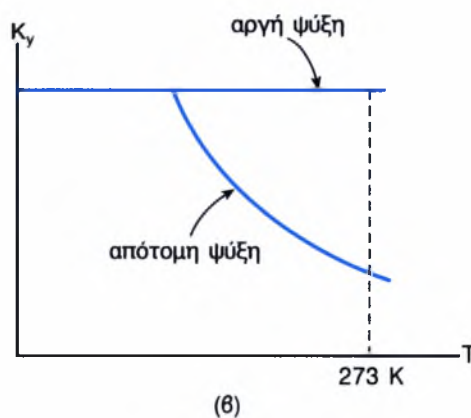
οπότε 
$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$

που είναι η σχέση Hall-Petch.

Τέλος ο συντελεστής  $k_y$  μπορεί να γραφτεί ως

$$k_y = k_0 \tau_s^{1/2}$$

Το  $k_y$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία μέσω του  $k_0$  και του  $\tau_s$ . Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του  $k_0$  προέρχεται από τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του μέτρου διατμήσεως  $\mu(\tau)$ . Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση  $\tau_s$  διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Εάν η  $\tau_s$  εκφράζει την αναγκαία τάση για τη λειτουργία της πηγής Frank-Reed τότε η  $\tau_s$  είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία γιατί οι πηγές Frank-Reed δεν απαιτούν θερμική ενεργοποίηση. Υπάρχει όμως η περίπτωση το  $\tau_s$  να εκφράζει την απαραίτητη τάση για την απελευθέρωση αταξιών από ατμόσφαιρες Cottrell στον κόκκο 2. Στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση του  $k_y$  εξαρτάται από το εάν η δέσμευση είναι ισχυρή ή χαλαρή. Εάν οι αταξίες είναι ισχυρά προσκολλημένες στις ατμόσφαιρες Cottrell (όπως π.χ. μετά από αργή ψύξη) τότε δεν μπορεί να υπάρξει θερμική υποβοήθηση και η  $\tau_s$  είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Εάν η δέσμευση είναι χαλαρή (όπως π.χ. μετά από απότομη ψύξη) τότε η θερμική ενεργοποίηση βοηθά τις αταξίες να αποδεσμευτούν και η  $\tau_s$  (και ο  $k_y$ ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία (Σχήμα 2.7).



**Σχήμα 2.7.** Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή  $k_y$  στη σχέση Hall-Petch

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΑΡΘΡΟ ASHBY**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό κάνουμε μία περίληψη του άρθρου Ashby[1] στο οποίο βασίστηκε αυτή η διπλωματική. Παραθέτουμε τα κυριότερα σημεία για την ανάπτυξη του μοντέλου, το μοντέλο εφαρμοσμένο στο κράμα 6061 και παρουσιάζουμε τις προσπάθειες για την εφαρμογή του μοντέλου σε άλλα κράματα , καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Τέλος παρουσιάζουμε τα κυριότερα συμπεράσματα του άρθρου.

#### **3.2 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ**

Στο άρθρο αυτό αναπτύχθηκε ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει τις αλλαγές του ορίου διαρροής των θερμικά κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου λόγω της ισχυροποίησης με καθίζηση. Ουσιαστικά παράγεται ένα διάγραμμα (μια ισόθερμη καμπύλη) το οποίο μας δείχνει τη μεταβολή του ορίου διαρροής σε σχέση με τη θερμοκρασία και το χρόνο γήρανσης.

Τα μοντέλα είναι ακόμη σπάνια στη διαδικασία των στερεών υλικών. Οι λόγοι γι' αυτό είναι διάφοροι, όπως το γεγονός ότι οι αντιδράσεις , η μεταφορά τάσεων και οι παραμορφώσεις που παίρνουν μέρος στη στερεή φάση είναι πιο πολύπλοκες από αυτές των αερίων και των υγρών. Αισθητήρες μπορούν εύκολα να εμφυτευθούν μέσα σε ρεύμα αερίων για να ελέγξουν τη διαδικασία, ενώ δεν μπορούν συχνά να τοποθετηθούν μέσα στα στερεά τα οποία υπόκεινται σε σοβαρές θερμικές και μηχανικές κατεργασίες.

Παρόλο το γεγονός ότι η πρόοδος των μοντέλων ήταν αργή, ένα επιτυχές μοντέλο προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως το να επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών και των ιδιοτήτων, καλύτερο έλεγχο ποιότητας, γρηγορότερη ανάπτυξη διαδικασίας και την πιθανότητα αυτόματου «έξυπνου» ελέγχου των πολύπλοκων διαδικασιών όπως αυτών της συγκόλλησης και της επιφανειακής θερμικής επεξεργασίας.

Αυτό το άρθρο λοιπόν περιγράφει μια πρώτη προσπάθεια να μονταριστεί ένα μοντέλο για την καθίζηση των απλούστερων κραμάτων αλουμινίου ισχυροποιημένων με καθίζηση. Οι αρχές είναι απλές αλλά η εφαρμογή του μοντέλου δεν είναι και τόσο. Το μοντέλο, σύμφωνα με το άρθρο, δίνει μια καλή περιγραφή μερικών κραμάτων των σειρών 2000 και 6000 αλλά δεν είναι ακόμη αρκετά κατανοητό να περιγραφούν τα πιο

πολύπλοκα υλικά της σειράς 7000 στα οποία η αλληλουχία της καθίζησης εμπλέκει πολλά στάδια.

### 3.3 ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την ανάπτυξη του μοντέλου, αναφέρονται φυσικά οι αλλαγές που παίρνουν μέρος στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της ισχυροποίησης με καθίζηση, καθώς μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε καλύτερα τους μηχανισμούς που μας δίνουν ένα σκληρό υλικό. Εκτενής αναφορά για τους μηχανισμούς ισχυροποίησης έχει γίνει στο κεφάλαιο 2.

Στη συνέχεια δημιουργείται η ανάγκη ύπαρξης συνιστωσών για την ανάπτυξη του μοντέλου. Αυτές οι «υποσυνιστώσες» περιέχουν εκφράσεις για :

- i. Την ανάπτυξη στο κλάσμα όγκου της καθίζησης και τη μείωση της συγκέντρωσης διαλυτοποίησης με το χρόνο, ανάμεσα στα βασικά στάδια της καθίζησης.
- ii. Την εξάρτηση της ισορροπίας του κλάσματος όγκου της καθίζησης από τις θερμοκρασίες καθίζησης.
- iii. Διεύρυνση καθίζησης από ανταγωνιστική ανάπτυξη.
- iv. Τη συνεισφορά της διαλυτοποίησης στην ισχυροποίηση.
- v. Τη συνεισφορά των διαπερατών σωματιδίων στην ισχυροποίηση.
- vi. Τη συνεισφορά των μη-διαπερατών σωματιδίων στην ισχυροποίηση.

Στο άρθρο παρουσιάζονται οι εξισώσεις που εξηγούν αυτές τις υποσυνιστώσες και περιγράφουν την πλήρη καμπύλη καθίζησης στο μοντέλο. Καθώς όμως οι εξισώσεις συνθέτονται, το μοντέλο αναπτύσσεται με πολυπλοκότητα και μια δυσκολία πρέπει να αντιμετωπιστεί. Τα υπομοντέλα είναι γνωστά να περιγράφουν το δικό τους τμήμα στη διαδικασία ικανοποιητικά, με την άμεση εξάρτηση τόσο στις μακροσκοπικές μεταβλητές: συγκέντρωση, θερμοκρασία, χρόνος κ.ά. όσο και στις μικροσκοπικές μεταβλητές: παράγοντες συχνότητας για ατομική διάχυση, ενέργειες ενεργοποίησης για διεύρυνση, σταθερές αλληλεπίδρασης αταξιών-διαλυτού και άλλα.

Αυτές δεν μπορούν να προβλεφθούν από τις πρώτες αρχές με την ακρίβεια που χρειαζόμαστε. Κάποιες μπορούν να μετρηθούν από λεπτομερή πειραματισμό (μικροσκοπική μετάδοση, μικροανάλυση, διάθλαση νευτονίου) αλλά αυτός ο δρόμος δεν είναι ο σωστός αν το μοντέλο θέλουμε να 'ναι πρακτικό.

Έτσι στο άρθρο αυτό η εναλλακτική λύση, από την ομάδα του Ashby, είναι να χωρίσουν τις σταθερές από τι καθ' αυτού καμπύλες

καθίζησης, χρησιμοποιώντας μια υπορύθμιση των δεδομένων για να ρυθμίσουν το μοντέλο. Πιστεύουν ότι αυτό είναι ένα απαραίτητο χαρακτηριστικό καθενός πετυχημένου μοντέλου. Έτσι σταθερές οι οποίες είναι σταθερές του υλικού, αντικαθιστώνται με σταθερές οι οποίες είναι σταθερές του υλικού αλλά δεν τους έχουν δοθεί αριθμητικές τιμές και συνδέονται άμεσα με τις πρώτες σταθερές.

Βήμα-βήμα συναρμολογείται το μοντέλο με τη συγκέντρωση των συνεισφορών στο όριο ροής. Στο επίπεδο προσέγγισης που επιδιώκεται εδώ, είναι αρκετό να χαρακτηρίσουμε το όριο ροής με το άθροισμα:

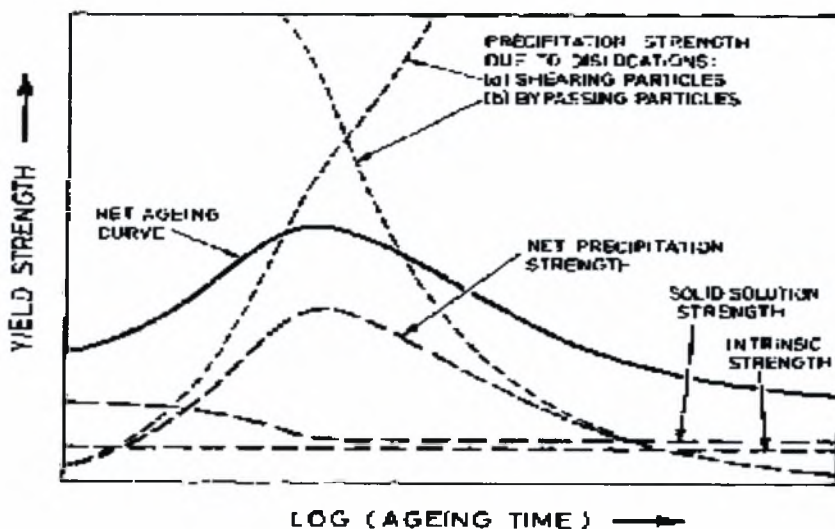
$$\sigma(t) = \sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt}$$

όπου  $\sigma_i$  όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης,

$\Delta\sigma_{ppt}$  αύξηση τάσης, λόγω καθίζησης στο πλέγμα

$\Delta\sigma_{ss}$  αύξηση ορίου ροής λόγω στερεού διαλύματος.

Οι συνεισφορές στην τάση φαίνονται στο διάγραμμα 3.1. Οι τρεις κυριότερες συνεισφορές στο όριο ροής ή στη σκληρότητα επέρχονται από το στερεό διάλυμα, τις καθιζήσεις και από την πλεγματική αντίσταση του κυρίως μετάλλου του κράματος.



**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ορίου ροής ως προς το χρόνο καθίζησης.

### 3.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΣΕ ΚΡΑΜΑ 6061

Αφού χρησιμοποιήθηκαν λεπτομερή δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την καθίζηση του κράματος 6061, σε 11 θερμοκρασίες ανάμεσα στους 107-260°C, ακολουθήθηκαν στο μοντέλο τα παρακάτω βήματα: (η ονοματολογία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, υπάρχουν στο παράρτημα Α.α)

- i. Επιλέχθηκαν οι τιμές  $\sigma_q=155$  MPa ,  $\sigma_i = 53$  MPa και υπολογίστηκε το  $\sigma_{oa}=[(\sigma_q+\sigma_i)/2]=104$  MPa.
- ii. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ( $t_p$ ,  $\sigma_p$ ) για κάθε θερμοκρασία όπως φαίνονται και στον πίνακα 3.1.a

(a) Data for peak time and yield stress, and evaluated parameters, at various temperatures

Temperature $T$ (°C)	Time to peak $t_p$ (s)	Peak yield stress $\sigma_p$ (MPa)	$10^{10} P_p$ (s/K)	$(\Delta\sigma_{pp})_p (=S_q)$ (MPa)
260	135	211.1	5.05	107.1
232	577	245.6	3.48	141.6
218	2491	247.7	5.59	143.7
204	5557	258.1	4.36	154.1
191	20,700	263.6	5.79	159.6
171	142,000	266.6	7.20	162.6
163	360,000	266.3	8.82	162.3
149	780,000	271.2	5.00	167.2
135	4,330,000	266.3	6.63	162.3

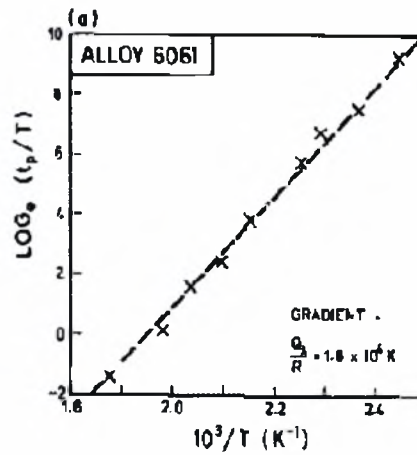
(b) Accepted values for the calibration parameters

Intrinsic yield stress	$\sigma_i$	53 MPa
As-quenched yield stress	$\sigma_q$	155 MPa
Activation energy for ageing	$Q_A$	145 kJ/mol
Metastable solvus temperature	$T_s$	270°C
Solvus boundary enthalpy	$Q_s$	30 kJ/mol
Strength parameter	$(S_0)_{max}$	200 MPa
Peak temperature-corrected time	$P_p$	$2.5 \times 10^{-11}$ s/K
Constant relating $z_1$ to $t_p$	$K_1$	0.5

**Πίνακας 3.1:** Δεδομένα για τις καμπύλες καθίζησης του κράματος 6061.

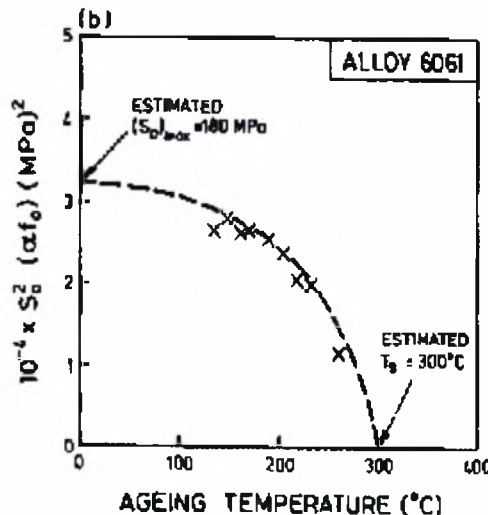
- iii. Πλοταρίστηκαν οι τιμές  $\log_e\left(\frac{tp}{T}\right) \leftrightarrow \frac{1}{T}$  και βρέθηκε η ενέργεια ενεργοποίησης  $Q_A=150$  kJ/mol από την κλίση του Σχήματος 3.2.a.





**Σχήμα 3.2.a :** Διάγραμμα  $\log_e \left( \frac{t_p}{T} \right) \leftrightarrow \frac{1}{T}$

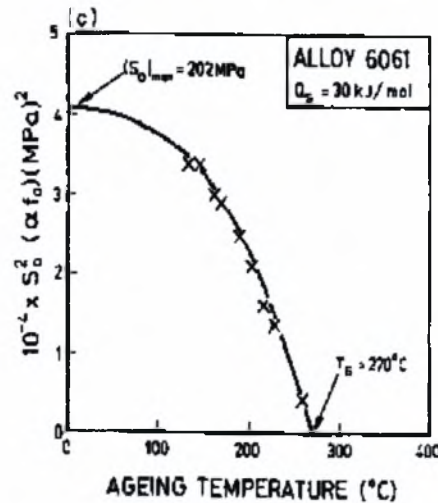
- iv. Υπολογίστηκε μία μέση τιμή του  $P_p$  για όλες τις τιμές ( $t_p$ ,  $T$ ) με τον τύπο  $P_p = (t_p/T) \cdot \exp(-Q_A/RT)$  καθώς και του  $P = 10^{16} P_p$ , έχοντας την τιμή  $Q_A$  από το βήμα iii.
- v. Για κάθε θερμοκρασία, υπολογίστηκε το  $S_o = (\Delta\sigma_{ppt})_p = \sigma_p - \left( \frac{\sigma_y + \sigma_i}{2} \right)$  καθώς και το  $S_o^2$  όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2.a.
- vi. Πλωταρίστηκαν οι τιμές  $S_o^2$  σε σχέση με τη θερμοκρασία καθίζησης  $T$  και υπολογίστηκε η  $T_s$  (θερμοκρασία metastable solvus) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.b.



**Σχήμα 3.2.b :** Το πρώτο πλωτάρισμα μεταξύ της  $S_o^2$  και της θερμοκρασίας  $T$ .

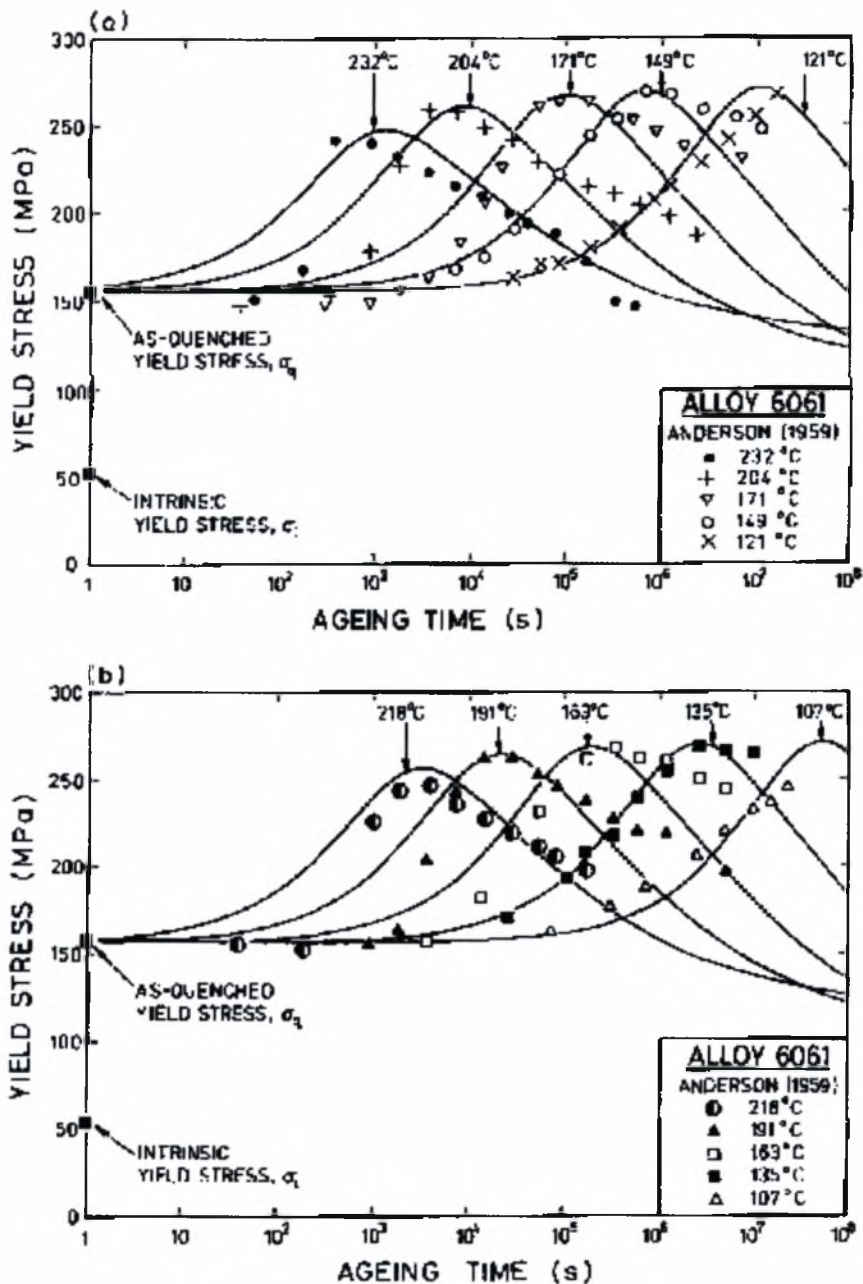
- vii. Χρησιμοποιήθηκε η σχέση 27α,  $S_o^2(T) = (S_o^2)_{\max} [1 - \exp(-\frac{Q_s}{R} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}))]$ , και από αυτή υπολογίστηκαν οι τιμές  $(S_o^2)_{\max}$ ,  $Q_s$ .

- viii. Μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων οι βέλτιστες τιμές (best fit) στο πλοτάρισμα  $S_o^2$ -T είναι  $T_s=270^0C$ ,  $(S_o)_{max}=202$  MPa,  $Q_s=30kJ/mol$ .
- ix. Αφού βρέθηκε και το βέλτιστο  $\sigma_{oa}$ , μέσω της σχέσης στο βήμα i, υπολογίστηκαν για κάθε T, τα  $\Delta\sigma_{ssi}=\sigma_q-\sigma_i$  και  $\Delta\sigma_{sso}=\sigma_{oa}+\sigma_i$  και πάρθηκε η τιμή  $K1=0,5$  από το άρθρο (σελ.1795 του άρθρου).



**Σχήμα 3.2.c :** Το τελευταίο πλοτάρισμα των  $S_o^2$  και της θερμοκρασίας T.

- x. Υπολογίστηκε η τιμή  $\tau_1$  από τη σχέση 26,  $\tau_1=K1 \cdot P_p \cdot T \cdot \exp(Q_A/RT)$ ,
  - xi. Υπολογίστηκε η τιμή  $\Delta\sigma_{ss}(t)$  από τη σχέση 25,
- $$\Delta\sigma_{ss}(t) = \left[ \Delta\sigma_{sso}^{\frac{3}{2}} + \left[ \Delta\sigma_{ssi}^{\frac{3}{2}} - \Delta\sigma_{sso}^{\frac{3}{2}} \right] \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$
- xii. Υπολογίστηκε η καμπύλη του ορίου διαρροής  $\sigma(t)$  σε σχέση με το χρόνο t, χρησιμοποιώντας τη σχέση 32,  $\sigma(t)=\sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt}$ .
  - xiii. Ενώθηκαν οι καμπύλες  $\sigma(t) \leftrightarrow t$  (συνεχείς γραμμές) και τα δεδομένα  $\sigma \leftrightarrow t$  (τα οποία φαίνονται με διάφορες κουκίδες) για το κράμα 6061 στο Σχήμα 3.3.a,b.



**Σχήμα 3.3.a,b:** Διαγράμματα ορίων ροής του κράματος 6061 από το άρθρο Ashby.

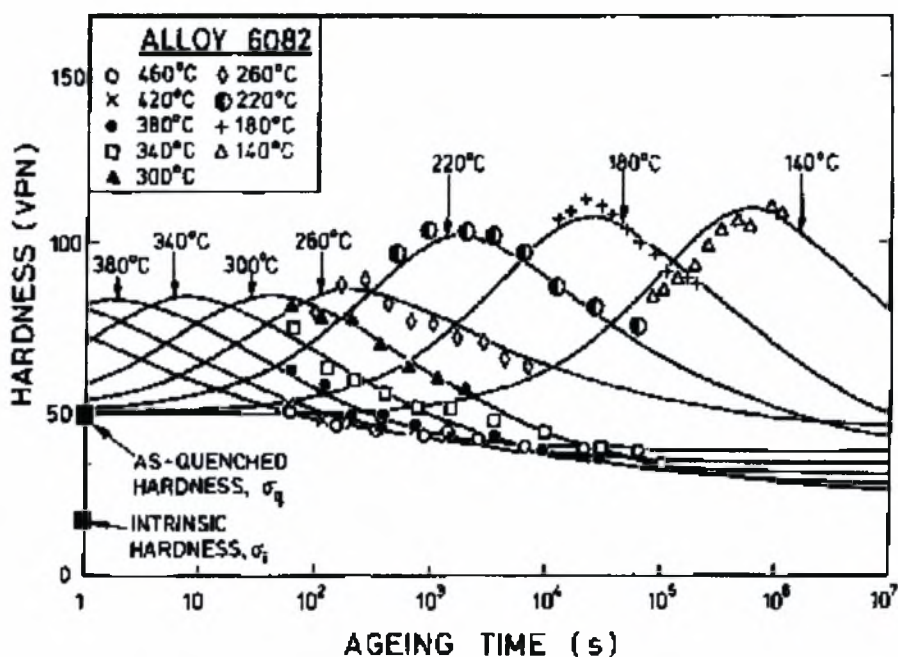
Πλοτάρονται δύο διαγράμματα για διαύγεια, λόγω πυκνότητας των δεδομένων. Το «ταίριασμα» (fit) στις κορυφές των καμπύλων είναι καλή. Η ανομοιότητα μεταξύ της θεωρίας και του πειράματος μακριά από τις κορυφές, ακολουθεί δύο γενικές κατευθύνσεις:

- Η προβλεπόμενη αύξηση στην κορυφή είναι πιο ομαλή απ' την πραγματικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Σε όλες τις θερμοκρασίες η σκληρότητα πέφτει κάτω από την κορυφή πιο ομαλά απ' ότι προβλέπεται, περίπου 20% μεγαλύτερες τιμές.



### 3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΑΛΛΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Τα δεδομένα για την καθίζηση του 6082 φαίνονται στο Σχήμα 3.4, με τα αποτελέσματα του μοντέλου (συνεχείς γραμμές), αυτή τη φορά εμπεριέχοντας το καθεστώς πάνω της metastable solvus temperature για τη χαμηλή-θερμοκρασία καθίζησης ( $282^{\circ}\text{C}$ ). Το κράμα έδειξε διακριτές κορυφές όταν ισχυροποιήθηκε στους  $260^{\circ}\text{C}$  και κάτω. Πάνω από τους  $300^{\circ}\text{C}$ , είναι διαθέσιμες μόνο οι «ουρές» υπεργήρανσης. Τελικές τιμές για τις παραμέτρους υπάρχουν στον πίνακα 3.3. Τα βήματα στο κομμάτι με τις υψηλές-θερμοκρασίες της ρύθμισης (πάνω από τη metastable solvus temperature) είναι πιο πολύπλοκα κι εμείς δεν τα μελετήσαμε. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν αναφέρονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο άρθρο για το κράμα 6082.



Σχήμα 3.4 Διαγράμματα του κράματος 6082 για 9 θερμοκρασίες καθίζησης.

Intrinsic hardness	$\sigma_i$	15 VPN
As-quenched hardness	$\sigma_q$	49 VPN
Activation energy for ageing	$Q_A$	130 kJ/mol
Transition temperature	$T_c$	$269^{\circ}\text{C}$
Metastable solvus temperature	$T_s$	$282^{\circ}\text{C}$
Phase boundary solvus temperature	$T_e$	$565^{\circ}\text{C}$
Solvus boundary enthalpy	$Q_s$	30 kJ/mol
Phase boundary enthalpy	$Q_e$	30 kJ/mol
Strength parameter (below $T_c$ )	$(S_0)_{\text{low}}$	94 VPN
Strength parameter (above $T_c$ )	$(S_0)_{\text{high}}$	64 VPN
Peak temperature-corrected time (below $T_c$ )	$P_c$	$5.5 \times 10^{-16} \text{ s/K}$
Peak temperature-corrected time (above $T_c$ )	$P_e$	$1.4 \times 10^{-13} \text{ s/K}$
Constant relating $\tau_1$ to $\tau_p$	$K_1$	0.5

Πίνακας 3.2: Οι αποδεκτές τιμές για τις παραμέτρους που έλαβαν μέρος κατά τη ρύθμιση των καμπύλων καθίζησης στο κράμα 6082.

Επίσης στο άρθρο αναφέρονται κάποιες προσπάθειες εφαρμογής του μοντέλου σε κράματα αλουμινίου-χαλκού (για διαφορετικές περιεκτικότητες σε χαλκό), καθώς και σε κράματα της σειράς 7000.

Όσον αφορά τα κράματα 7000 η εφαρμογή του μοντέλου είναι πολύ δύσκολη, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα κι αυτό γιατί η έκταση των δεδομένων δεν ήταν αρκετή για να επιτρέψει μία πλήρη ρύθμιση.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ**

#### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν από το δικό μας προγραμματισμό για την μοντελοποίηση των κραμάτων και τη διεξαγωγή ισόθερων καμπύλων. Στο τελευταίο μέρος του, κάνοντας μια προσπάθεια βελτίωσης του μοντέλου, προστέθηκε ένας νέος όρος στο όριο ροής λόγω συνεισφοράς του μεγέθους των κόκκων στην ισχυροποίηση του κράματος. Τέλος περιγράφεται η μεταλλογραφική ανάλυση καθώς και η κοκκομετρία που ακολουθήθηκε για τη χρήση των δεδομένων της στο νέο όρο που προσθέσαμε στο μοντέλο.

#### **4.2 ΑΡΧΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (ακολουθώντας τα βήματα του άρθρου Ashby)**

Πρίν ξεκινήσει η εφαρμογή του μοντέλου, μελετήθηκε πολύ προσεκτικά το άρθρο Ashby, όντας κατανοητή κάθε παράμετρος καθώς και η λειτουργία της μέσα στο μοντέλο. Ακόμη βρέθηκαν με χάρακα και στυλό τα δεδομένα ζευγάρια ( $\sigma$ ,  $t$ ) από τα διαγράμματα 3.3.a-b για κάθε θερμοκρασία καθίζησης, μιας και στο άρθρο Ashby δεν υπήρχαν οι τιμές αυτές σε πινακάκια. Τα ζευγάρια αυτά χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμά μας με σκοπό να εξαχθούν αντίστοιχα διαγράμματα με αυτά του άρθρου. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί η σύσταση του κράματος 6061, η οποία δίνεται στον παρακάτω πίνακα 4.1.

Στοιχείο	Mg	Si	Cr	Cu
wt%	1	0.6	0.25	0.25

**Πίνακας 4.1.** Ονομαστική συγκέντρωση (wt%) του αλουμινίου 6061

Αφού ολοκληρώθηκαν τα παραπάνω ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα για το κράμα 6061, στο Mathematica: (η ερμηνεία των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται υπάρχουν στο παράρτημα Α.β).

- i. Εισαγωγή ορίων ροής του κράματος
  - i.  $\sigma_q = 155 \text{ MPa}$
  - ii.  $\sigma_i = 53 \text{ MPa}$  και εκτίμηση του  $\sigma_{oa} = (\sigma_q + \sigma_i)/2$ .

- ii. Εισαγωγή της σταθεράς αερίων  $R$ , και των θερμοκρασιών καθίζησης  $T[^\circ K]$  και  $T1[^\circ C]$  καθώς και των χρόνου και ορίου ροής  $(t_p, \sigma_p)$  στο μέγιστο της καμπύλης (δεδομένα από το άρθρο του Ashby).
- iii. Σχεδιασμός καμπύλης  $\log_e\left(\frac{tp}{T}\right) \leftrightarrow \frac{1}{T}$  για όλα τα  $t_p$  και διεξαγωγή της κλίσης της καμπύλης  $Q_A$  με γραμμική παρεμβολή.
- iv. Χρήση της εξίσωσης  $P_p = (t_p/T) \cdot \exp(-Q_A/RT)$  για εύρεση του  $P_p$  για κάθε θερμοκρασία καθίζησης κι έπειτα υπολογισμός ενός μέσου όρου των τιμών  $P_p$ .
- v. Υπολογισμός  $S_o = (\Delta\sigma_{ppt})_p = \sigma_p - \left(\frac{\sigma_q + \sigma_i}{2}\right)$
- vi. Σχεδιασμό καμπύλης  $T1$  και  $S_o^2$ .
- vii. Με χρήση της εντολής FindFit (για παρεμβολή ελαχίστων τετραγώνων) και της σχέσης 27α,  

$$S_o^2(T) = (S_o^2)_{\max} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Q_s}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \right]$$
, υπολογίζονται τα  $(S_o^2)_{\max}$ ,  $Q_s$ ,  $T_s$ .
- viii. Με χρήση της σχέσης  

$$\sigma_{oa} = \sigma_i + (\sigma_q - \sigma_i) \cdot \exp\left(-\frac{2Q_s}{3R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \quad (31)$$
 υπολογίζεται το νέο  $\sigma_{oa}$ .
- ix. Επιστροφή στο βήμα v. και δημιουργία επανάληψης (do loop) έως ότου  $(\sigma_{oa})_{\text{new}} - (\sigma_{oa})_{\text{old}} = 5\text{MPa}$  (δική μας επιλογή η απόκλιση αυτή), οπότε και η εξαγωγή των τελικών  $(S_o^2)_{\max}$ ,  $Q_s$ ,  $T_s$ ,  $(S_o)_{\max}$  και  $(\sigma_{oa})_{\text{new}}$ .
- x. Χρήση της σταθεράς  $K_1 = 0,5$  και υπολογισμός των  $\Delta\sigma_{ssi} = \sigma_q - \sigma_i$  και  $\Delta\sigma_{sso} = \sigma_{oa} + \sigma_i$
- xi. Εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων (όλα τα ζεύγη  $(t, \sigma)$  για κάθε θερμοκρασία καθίζησης). Έχει γίνει χρήση μόνο των 8 ζευγών  $(t, \sigma)$  από το άρθρο του Ashby, λόγω ελλειπών δεδομένων στο Σχήμα 3.3 a,b.
- xii. Για την εκάστοτε θερμοκρασία καθίζησης  $T1$  και άρα τα αντίστοιχα ζεύγη  $(t, \sigma)$  υπολογίζουμε τα:  

$$S_o = \sigma_p - (\sigma_{oa})_{\text{new}},$$

$$P = \frac{t}{T} \exp\left(-\frac{Q_A}{RT}\right) \quad (14),$$

$$P_p = (t_p/T) \cdot \exp(-Q_A/RT) \text{ και}$$

$$\tau_1 = K_1 \cdot t_p$$

xiii. Εισαγωγή των σχέσεων

$$\Delta\sigma_{ss}(t) = \left[ \Delta\sigma_{ss0}^{\frac{3}{2}} + \left[ \Delta\sigma_{ssi}^{\frac{3}{2}} - \Delta\sigma_{ss0}^{\frac{3}{2}} \right] \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

$$\Delta\sigma_{ppt} = \frac{2 \cdot S_o \cdot (P^*)^{\frac{1}{6}}}{1 + (P^*)^2} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_A &= 2 \cdot S_o (P^*)^{\frac{1}{6}} \\ \Delta\sigma_B &= \frac{2 \cdot S_o}{(P^*)^{\frac{1}{3}}} \end{aligned} \right\} \quad (22),$$

$$\text{όπου } P^* = \frac{P}{P_p}$$

$$\text{και } \sigma(t) = \sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt}$$

xiv. Σχεδιασμός διαγραμμάτων των τελευταίων σχέσεων.

xv. Για την εκάστοτε θερμοκρασία καθίζησης, ένα διάγραμμα με όλες τις καμπύλες των σχέσεων στο βήμα xiii. κι ένα διάγραμμα με την καμπύλη της σχέσης (32)  $\sigma(t) = \sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt}$  και των δεδομένων από τους πίνακες του βήματος xi. (συνολικά 16 διαγράμματα).

### 4.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΡΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΟΚΚΩΝ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, οι μηχανισμοί ισχυροποίησης των μετάλλων είναι πέντε. Από τη σχέση (32)  $\sigma(t) = \sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt}$  παρατηρείται ότι στο μοντέλο μας, για τον υπολογισμό του ορίου ροής έχουν συμπεριληφθεί μόνο οι τρεις μηχανισμοί ισχυροποίησης, δηλαδή

- i. λόγω πλεγματικής αντίστασης,
- ii. λόγω στερεού διαλύματος και
- iii. λόγω καθίζησης.

Η ισχυροποίηση λόγω εργοσκήρυνσης, παρόλο που είναι ένας από τους πιο σημαντικούς μηχανισμούς ισχυροποίησης, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων για τα κράματα αλουμινίου που μελετάται, δε μπορεί να συμπεριληφθεί η συνεισφορά της, λόγω του ότι είναι θερμικά κατεργάσιμα. Η πλαστική παραμόρφωση υφίσταται κατά τις ψυχρές κατεργασίες διαμορφώσεως κι άρα η ισχυροποίηση της εργοσκήρυνσης έχει μικρή θερμοκρασιακή εξάρτηση, σε αντίθεση με την ισχυροποίηση της καθίζησης που έχει μεγάλη.

Η ισχυροποίηση που πιθανά θα μπορούσαμε να προσθέσουμε στη σχέση (32) είναι αυτή λόγω των συνόρων των κόκκων. Ο όρος που προσθέτει την ισχυροποίηση αυτή, δίνεται από τη σχέση Hall-Petch(δείτε κεφάλαιο 2)

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$

Όπου  $k_y$ : συντελεστής Hall-Petch, ο οποίος για τα κράματα που μελετάμε είναι  $k_y = 0,23 \text{ MN/m}^{3/2}$  [3], και  $d$  = η μέση διάμετρος των κόκκων.

Τα κράματα όμως τα οποία μελετώνται σ' αυτή την εργασία ακολουθούν την κατάσταση T6, δηλαδή κατά τη διαλυτοποίηση γίνεται τεχνητή γήρανση. Όπως είναι γνωστό στη γήρανση γίνεται ανάπτυξη των κόκκων. Κατά την ανάπτυξη των κόκκων, η μέση διάμετρος  $\bar{D}$  των κόκκων αυξάνεται και ισχύει

$$\bar{D}^2 = k * t + \bar{D}_o^2 \quad [3]$$

$$\text{με } \bar{D} = \bar{D}_o \text{ για } t = t_o = 0$$

$$\text{και } k = 4M^* \gamma * V_m.$$

Η μέση διάμετρος  $\bar{D}$  των κόκκων δηλαδή έχει μία παραβολική σχέση με το χρόνο  $t$ . Συγκεκριμένα η σχέση  $\bar{D}^2 = k * t + \bar{D}_o^2$  ισχύει για ανάπτυξη κόκκων σ' ένα μονοφασικό υλικό, που στην περίπτωσή μας ισχύει λόγω του ότι έχουμε κατάσταση T6 στα κράματα που μελετούμε. Έτσι έχοντας την  $\bar{D}_o = 20 \mu\text{m}$  για  $t = t_o = 0$  [4] και βρίσκοντας την  $\bar{D}$  από την κοκκομετρία (παράγραφος 4.3.3) για χρόνο  $t \cong 10^6$ , είναι εύκολο να βρεθεί η τιμή του  $k$ . Η τιμή  $\bar{D}$  που βρέθηκε από την κοκκομετρία είναι

$$\bar{D} = 41,39 \mu\text{m} \text{ οπότε από τη σχέση } k = \frac{\bar{D}^2 - \bar{D}_o^2}{t} = 1313 \mu\text{m/sec}.$$

Επομένως η σχέση (32) του μοντέλου, θα μετατραπεί σε

$$\sigma(t) = \sigma_i + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ppt} + \Delta\sigma_{grain}$$

$$\text{όπου } \Delta\sigma_{grain} = k_y * [(\bar{D}_o^2 + k * t)^{1/2}]^{-1/2}.$$

## 4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την κοκκομετρία του κράματος 6061, απαιτήθηκε αρχικά να γίνει μεταλλογραφία σε δοκίμιά του. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μεταλλογραφική προετοιμασία του ελατού κράματος 6061 και την παρατήρηση της μικροδομής του στο οπτικό μικροσκόπιο καθώς και η διαδικασία της κοκκομετρίας, περιγράφονται παρακάτω.



#### 4.4.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

- Εύρεση δοκιμίων

Για τα δοκίμια δεν απαιτήθηκε η κοπή υλικού διότι υπήρχαν έτοιμα δοκίμια στο εργαστήριο λόγω παλαιότερων διδακτορικών εργασιών πάνω στο συγκεκριμένο υλικό. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια ελατού κράματος 6061. Το πρώτο δοκίμιο ήταν κομμένο για την παρατήρηση της μικροδομής στην επιφάνεια της έλασης, το δεύτερο για την παρατήρηση παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης (διαμήκης τομή) και το τρίτο για την εξέταση κάθετα στη διεύθυνση έλασης (εγκάρσια τομή).

- Εγκιβωτισμός δειγμάτων

Τα μεταλλικά δοκίμια τοποθετήθηκαν μέσα σε ειδικά κυλινδρικά καλούπια, τα οποία πληρώθηκαν με ακρυλική ρητίνη τύπου Acryfix Struers (40 ml πούδρα και 20ml υγρό για τρία καλούπια). Όταν η ρητίνη στερεοποιήθηκε, αφαιρέθηκε το δοκίμιο από το καλούπι, το οποίο ήταν έτοιμο για τις υπόλοιπες διαδικασίες.

- Λείανση και στίλβωση

Η λείανση με την οποία επιτεύχθηκε η απομάκρυνση της παραμορφωμένης επιφάνειας από την επιφάνεια των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας περιστρεφόμενους δίσκους που καλύφθηκαν με χαρτί κόκκων SiC κοκκομετρίας 120, 220, 500, 800 και 1000, κόκκων καρβιδίου του πυριτίου (SiC) ανά τετραγωνική ίντσα. Η διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει επίπεδη. Μετά από την τελική διαδικασία λείανσης σε χαρτί 1000 grit, το δοκίμιο εκπλύθηκε με νερό και ακολούθως με οινόπνευμα ενώ τέλος στεγνώθηκε καλά με ρεύμα θερμού αέρα πριν τη μετακίνησή του στους στίλβωτές.

Η στίλβωση άρχισε με διαμαντόπαστα τύπου Dp-Paste και δίσκο των 3μm τύπου Dp-Mol και συνεχίστηκε με τον δίσκο του 1μm ίδιου τύπου και στίλβωτικό υγρό τύπου Dp-Lubricant Green. Ενδιάμεσα στα βήματα, το κάθε δείγμα καθαρίστηκε λεπτωμερώς χρησιμοποιώντας οινόπνευμα και ακολούθως στεγνώθηκε με ρεύμα θερμού αέρα. Για την τελική στίλβωση του δοκιμίου από κράμα 6061, στο δίσκο περιχύθηκε αλουμίνα OP-S Suspension ώστε να μπορέσουμε μετά τη στίλβωση να έχουμε καλύτερη παρατήρηση του κράματος στο 1μm.

- Χημική προσβολή

Η χημική προσβολή είχε ως στόχο την αποκάλυψη της μικροδομής του κράματος στο οπτικό μικροσκόπιο. Συγκεκριμένα για το κράμα 6061 χρησιμοποιήθηκε χημικό αντιδραστήριο Keller's reagent αποτελούμενο από:

- 2ml HF(48%)
- 3ml HCl(conc)
- 5ml HNO<sub>3</sub> (conc)
- 190ml νερό (H<sub>2</sub>O)

Η γυαλισμένη επιφάνεια των δοκιμίων βυθίστηκε στο αντιδραστήριο για 10-20 λεπτά και στη συνέχεια εκπλύθηκε με οινόπνευμα και στεγνώθηκε με ρεύμα θερμού αέρα. Ακολούθησε εξέταση στο μικροσκόπιο και περαιτέρω χημική προσβολή εάν αυτό κρινόταν απαραίτητο.

- Παρατήρηση της μικροδομής στο οπτικό μικροσκόπιο

Το επόμενο στάδιο ήταν η παρατήρηση των δοκιμίων σε οπτικό μικροσκόπιο (Leitz Aristomet), το οποίο αποτελείται από δύο προσοφθάλμιους και πέντε μεγεθυντικούς φακούς. Οι παρατηρήσεις στο μικροσκόπιο ξεκίνησαν με μία μικρή μεγέθυνση, η οποία ακολουθήθηκε σταδιακά από μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, έτσι ώστε να εκτιμηθούν ικανοποιητικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Προκειμένου να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα της μεταλλογραφίας τοποθετήθηκε ψηφιακή κάμερα στο μικροσκόπιο. Έτσι πάρθηκαν κάποιες φωτογραφίες σε διάφορες αναλύσεις, τις οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε για την κοκκομετρία.

#### 4.4.3 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ

Για την κοκκομετρία του κράματος 6061 χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό πρόγραμμα, το Image Pro Plus. Οι εργασίες που ακολουθήθηκαν στο πρόγραμμα αυτό είναι οι εξής:

Αρχικά ανοιγόταν αρχείο με φωτογραφίες του κράματος 6061, οι οποίες είχαν παρθεί από το οπτικό μικροσκόπιο. Ανάλογα με τη μεγέθυνση που είχε βγει η φωτογραφία (π.χ. 200x, 500x), γινόταν μία ρύθμιση του χάρακα του προγράμματος ώστε να μπορέσει αυτό να υπολογίσει σωστά το μέγεθος των κόκκων. Έτσι στη συνέχεια στην κάθε φωτογραφία έβγαιναν δύο διαγώνιες και μία κάθετη γραμμές, οι οποίες διαχωρίζονταν από τα σύνορα των κόκκων και μας μετρούσαν το μέγεθος αυτών.



Στο πρώτο δοκίμιο, για την παρατήρηση της μικροδομής στην επιφάνεια της έλασης, πάρθηκαν πέντε φωτογραφίες με μεγέθυνση 200x, στο δεύτερο δοκίμιο, με τη διαμήκη τομή, πέντε φωτογραφίες με μεγέθυνση 500x και πέντε με μεγέθυνση 1000x, ενώ στο τρίτο δοκίμιο, με την εγκάρσια τομή, πάρθηκαν πέντε φωτογραφίες με μεγέθυνση 200x και τρεις με 500x.

Εφόσον έγιναν τις μετρήσεις όλων των φωτογραφιών ενός δοκιμίου για μία μεγέθυνση, συγκεντρώθηκαν τα στοιχεία σε αρχείο Excel. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για όλα τα δοκίμια και όλες τις μεγεθύνσεις. Για την ακριβή διάμετρο των κόκκων σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ο τύπος  $D = 1,571 \cdot l$ , όπου l: μέση γραμμική απόσταση τομών που υπήρχε στα στοιχεία μας.

Έτσι αφού μετατράπηκαν οι διάμετρος σε μm και ακολουθήθηκε αυτή τη διαδικασία για όλες τις φωτογραφίες, βγήκαν τα εξής:

	<b>Μέσος όρος διαμέτρου κόκκων [μm]</b>
<b>1<sup>ο</sup> δοκίμιο</b>	89,9
<b>2<sup>ο</sup> δοκίμιο</b>	36,8
<b>3<sup>ο</sup> δοκίμιο</b>	45,9
<b>Συνολικός μέσος όρος της διαμέτρου</b>	<b>57,59</b>

**Πίνακας 4.2.** Ο μέσος όρος διαμέτρου των κόκκων των τριών δοκιμίων καθώς και ο συνολικός τους μέσος όρος σε μm.

Λόγω όμως του ότι ο συνολικός μέσος όρος των διαμέτρων είναι αρκετά μεγάλος, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος του δευτέρου και του τρίτου δοκιμίου που είναι  $\bar{D} = 41,39 \mu\text{m}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

#### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Μετά την εφαρμογή του μοντέλου Ashby με χρήση του Mathematica για το κράμα 6061, ακολούθησε η παρατήρηση και η σύγκριση τόσο των παραμέτρων όσο και των διαγραμμάτων που διεξήχθησαν σε σχέση με τα αντίστοιχα του άρθρου Ashby. Επίσης στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, εκτός από τα πρώτα διαγράμματα, παρουσιάζονται νέα διαγράμματα στα οποία έχει προστεθεί η συνεισφορά του μεγέθους των κόκκων του κράματος, στην ισχυροποίηση. Τέλος, γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης της επιρροής κάποιων συνιστωσών στο όριο ροής του κράματος.

#### **5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΡΘΡΟ ASHBY**

Αρχικά στον κώδικά μας παρατηρήθηκε πως οι τιμές ορισμένων παραμέτρων που εξάγονται είναι διαφορετικές από αυτές του άρθρου. Οι τιμές αυτές είναι οι εξής:

<b>Τιμές Άρθρου</b>	<b>Τιμές από Mathematica</b>
$Q_A=150 \text{ kJ/mol}$	$Q_A=157,083 \text{ kJ/mol}$
$P_p=5,77 \cdot 10^{-16} \text{ s/K}$	$P_p=9,12967 \cdot 10^{-17} \text{ s/K}$
$(S_o)_{\max}=202 \text{ MPa}$	$(S_o)_{\max}=193,837 \text{ MPa}$
$T_s=270^{\circ}\text{C}$	$T_s=296,052^{\circ}\text{C}$
$Q_s=30 \text{ kJ/mol}$	$Q_s=12,1699 \text{ kJ/mol}$

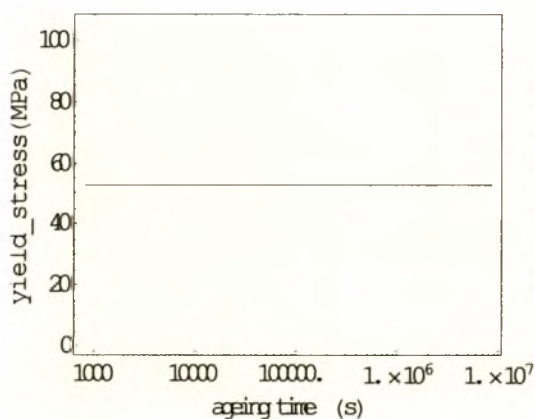
**Πίνακας 5.1** Οι διαφορετικές τιμές ορισμένων παραμέτρων στον κώδικά μας σε σχέση με αυτών του άρθρου.

Οι δύο πρώτες τιμές,  $Q_A$  και  $P_p$ , αναμενόταν να είναι ίδιες με αυτές του άρθρου, μιας και τα αρχικά βήματα στον προγραμματισμό μας (δείτε κεφάλαιο 4.2) είναι ίδια. Η μόνη εξήγηση για τα διαφορετικά

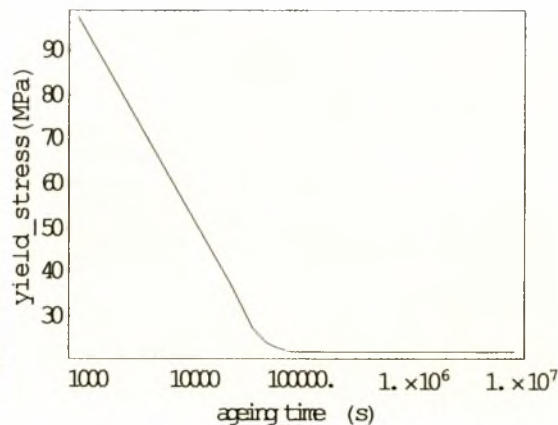
αποτελέσματα, θα μπορούσε να είναι λόγω διαφορετικής μεθόδου εύρεσης των παραπάνω τιμών. Στο δικό μας κώδικα χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή με την εντολή Fit του Mathematica.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι στο άρθρο (κεφάλαιο 3.4) αρχικά υπολογίζεται η τιμή  $Q_A=150$  kJ/mol, ενώ στον πίνακα 3.1 φαίνεται πως η τιμή που χρησιμοποιούνε τελικά στην μοντελοποίηση, είναι διαφορετική ( $Q_A=145$  kJ/mol) και δεν είναι κατανοητό για ποιο λόγο, μιας και η ενέργεια ενεργοποίησης  $Q_A$  υπολογίζεται μόνο μία φορά.

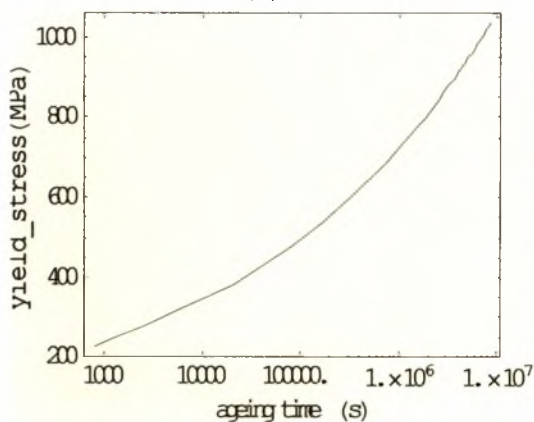
Στη συνέχεια αφού ολοκληρώθηκε ο κώδικας στο Mathematica εξήχθησαν μια σειρά από καμπύλες για όλες τις θερμοκρασίες καθίζησης που εισήχθησαν. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες αυτές για θερμοκρασία καθίζησης  $T=191^{\circ}\text{C}$ .



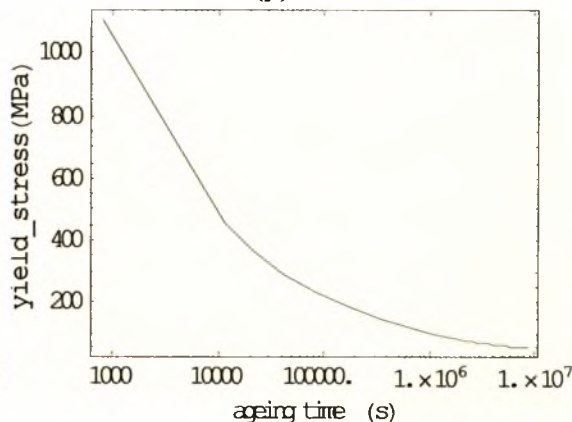
(α)



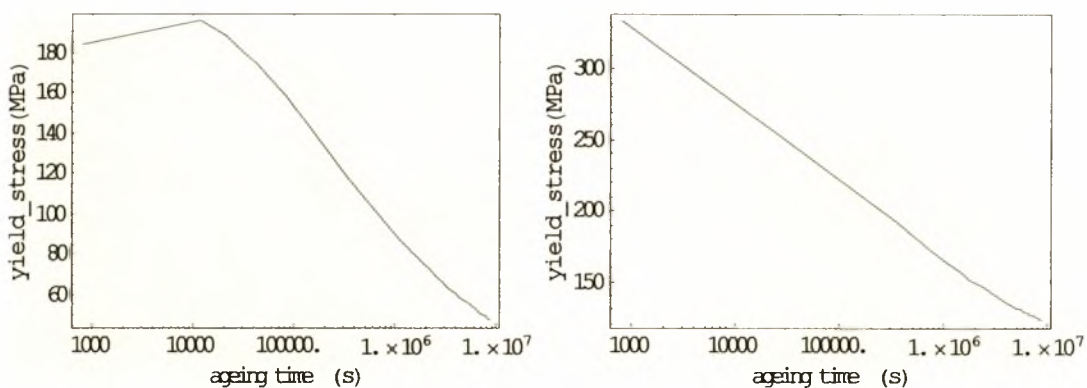
(β)



(γ)

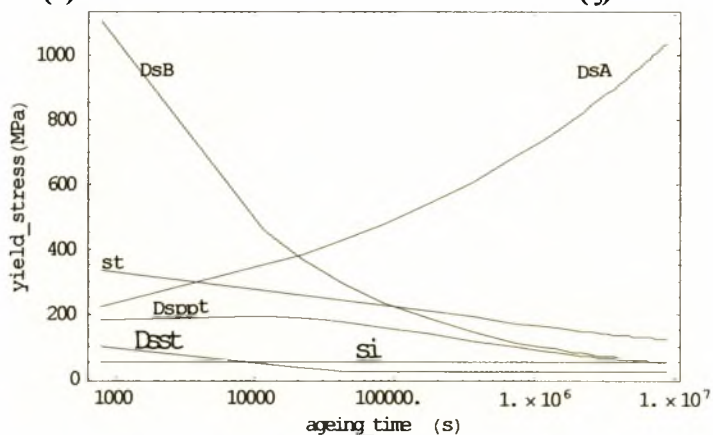


(δ)

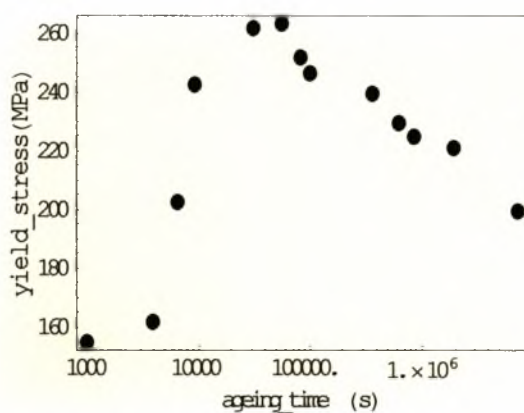


(ε)

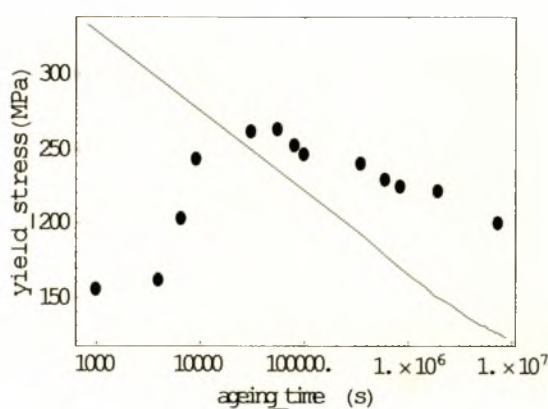
(ζ)



(η)



(θ)



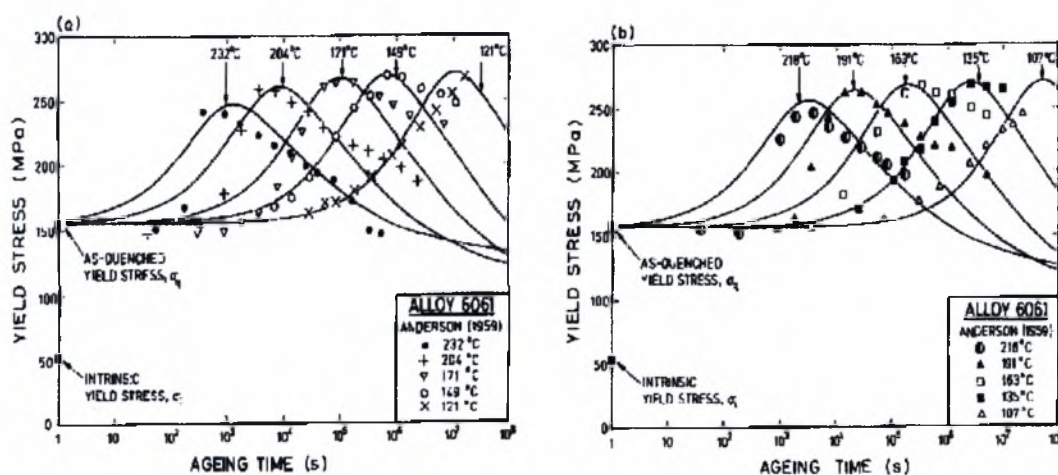
(ι)

**Σχήμα 5.1** (α)  $\sigma_i$ , Όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης, (β)  $\Delta\sigma_{ss}$ , Αύξηση ορίου ροής λόγω στερεού διαλύματος, (γ)  $\Delta\sigma_A$ , Ισχυροποίηση συνοχής, (δ)  $\Delta\sigma_B$ , Ισχυροποίηση Orowan, (ε)  $\Delta\sigma_{ppt}$ , Αύξηση ορίου ροής λόγω καθίζησης στο πλέγμα, (ζ)  $\sigma(t)$ , όριο ροής του κράματος, (η) Διάγραμμα με όλες τις καμπύλες που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος, (θ) Τα δεδομένα ζεύγη(σ,t), (ι) Διάγραμμα με τα δεδομένα ζεύγη (σ,t) και το όριο ροής  $\sigma(t)$  του κράματος [για θερμοκρασία καθίζησης  $T=191^\circ\text{C}$ ].

Όλες οι καμπύλες παρατηρείται πως έχουν μία αναμενόμενη μορφή με βάση αυτά που είναι γνωστά από τη βιβλιογραφία. Μάλιστα το Σχήμα 5.1.(η) το οποίο είναι ένα διάγραμμα με όλες τις καμπύλες οι οποίες συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος είναι ίδιας μορφής με το Σχήμα 3.1 (κεφάλαιο 3) το οποίο εμφανίζεται στο άρθρο Ashby. Η σημαντική διαφορά που έχουν μεταξύ τους αυτά τα δύο σχήματα είναι ότι το Σχήμα 5.1(η) έχει αριθμητικές τιμές κι έχει διεξαχθεί κατόπιν μοντελοποίησης, ενώ το Σχήμα 3.1 είναι απλά μια απεικόνιση των καμπυλών που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος.

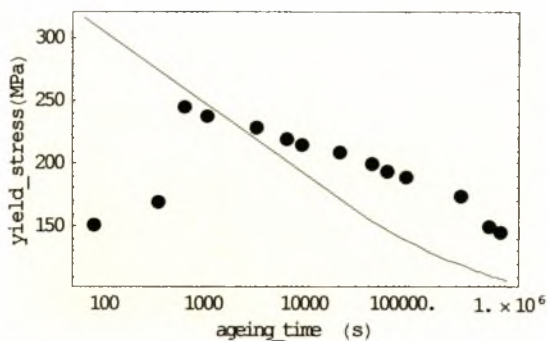
Ο στόχος της εργασίας αυτής όμως, πέραν της εφαρμογής του μοντέλου, είναι να διαπιστωθεί εάν το μοντέλο του άρθρου περιγράφει τη μεταβολή του ορίου ροής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και το χρόνο καθίζησης κι αν τα διαγράμματα ορίου ροής που διεξάγονται στο άρθρο έχουν διαφορές με τα διαγράμματα που διεξήχθησαν από τη δική μας μοντελοποίηση.

Παρακάτω παρουσιάζεται αρχικά το Σχήμα 3.3.a,b που είναι τα διαγράμματα ορίων ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma$ , $t$ ) για το κράμα 6061 από το άρθρο Ashby και στη συνέχεια το Σχήμα 5.2 που είναι τα αντίστοιχα διαγράμματα από τη μοντελοποίησή μας.

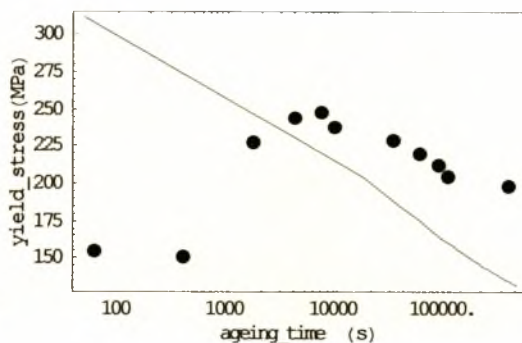


**Σχήμα 3.3.a,b:** Διαγράμματα ορίων ροής του κράματος 6061 από το άρθρο Ashby.

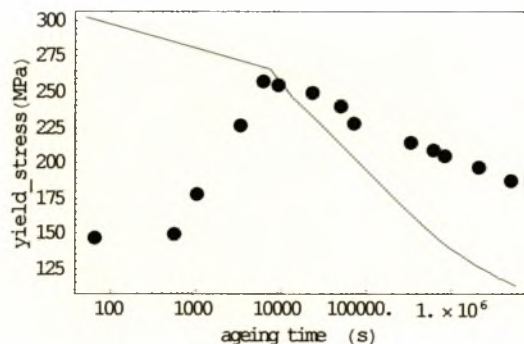




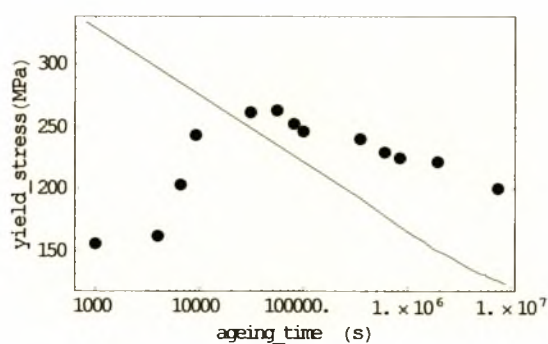
**T=232°C**



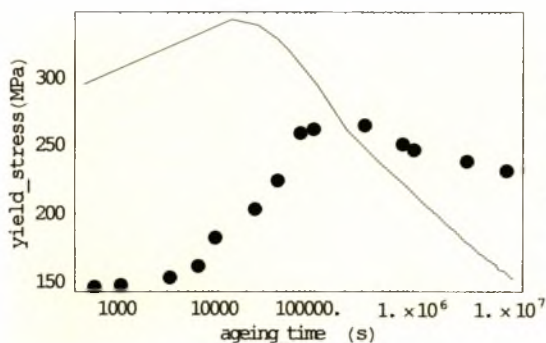
**T=218°C**



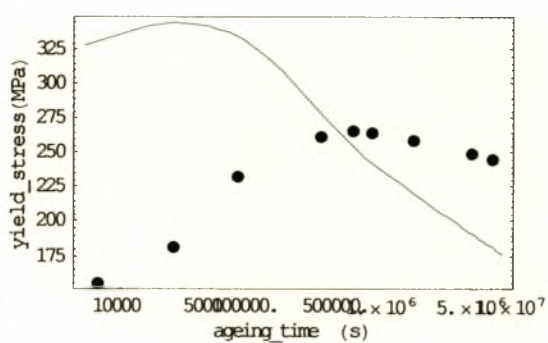
**T=204°C**



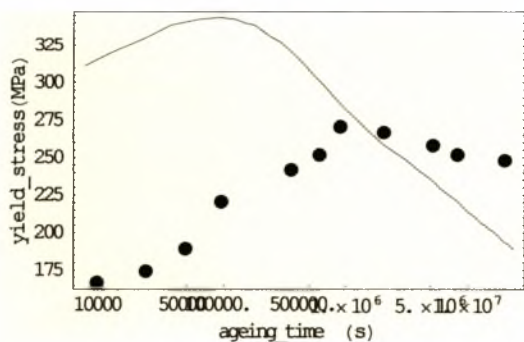
**T=191°C**



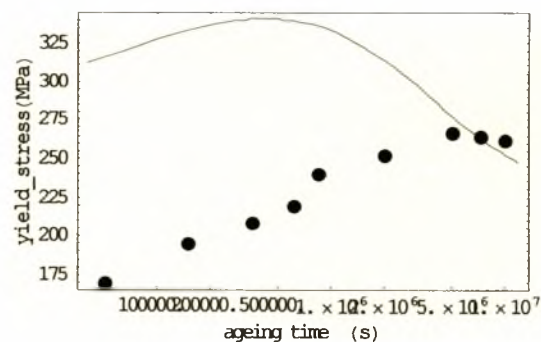
**T=171°C**



**T=163°C**



**T=149°C**



**T=135°C**

**Σχήμα 5.2:** Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma, t$ ) από το Mathematica για διάφορες θερμοκρασίες καθίζησης.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι:

- Τα διαγράμματα της μοντελοποίησής μας (Σχήμα 5.2) έχουν την αναμενόμενη μορφή. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες καθίζησης όμως  $T=232,218,204,191^{\circ}\text{C}$  η καμπύλη  $\sigma(t)$ , το όριο ροής του κράματος 6061, έχει μια γραμμική μορφή το οποίο συμβαίνει μάλλον λόγω κάποιων γραμμικοποιήσεων στο Mathematica, ενώ αντίθετως στα αντίστοιχα διαγράμματα του άρθρου (Σχήμα 3.3.a.b) αυτό δε συμβαίνει.
- Στο άρθρο (Σχήμα 3.3.a.b) οι περισσότερες καμπύλες είναι ψηλότερα από τα δεδομένα ζεύγη( $\sigma, t$ ) μετά το όριο ροής κορυφής  $\sigma_p$  δηλαδή στην «ουρά» της καμπύλης. Ενώ αντίθετα στα διαγράμματά μας (Σχήμα 5.2) σε κάθε θερμοκρασία καθίζησης,  $\sigma(t) < \sigma$  στην «ουρά» της καμπύλης.
- Γενικότερα παρατηρείται πως στο άρθρο (Σχήμα 3.3.a.b) οι καμπύλες ορίου ροής για κάθε θερμοκρασία και χρόνο καθίζησης είναι πολύ κοντά στα δεδομένα ζεύγη( $\sigma, t$ ) τα οποία ζεύγη δείχνουν τι συμβαίνει στην πραγματικότητα στο κράμα 6061. Το γεγονός ότι οι δικές μας καμπύλες σε χαμηλούς χρόνους καθίζησης (ανάλογα με τη θερμοκρασία καθίζησης, μέχρι  $t=1000$  ή  $t=10^4$  sec, κ.τ.λ.) είναι πολύ ψηλότερα από το πραγματικό όριο ροής σε εκείνους τους χρόνους, δείχνει ελλείψεις του μοντέλου Ashby.
- Στο άρθρο Ashby το όριο ροής είναι πάντα  $<300\text{MPa}$  ενώ στο δικό μας μοντέλο για ορισμένες θερμοκρασίες καθίζησης είναι  $>325\text{MPa}$ . Με βάση τα δεδομένα ζεύγη ορίων ροής κορυφής ( $\sigma_p, t_p$ ), το μεγαλύτερο όριο ροής είναι  $\sigma_p=271,2\text{MPa}$  για θερμοκρασία καθίζησης  $T=149^{\circ}\text{C}$  ενώ στη δική μας μοντελοποίηση για την ίδια θερμοκρασία καθίζησης, φαίνεται στο Σχήμα 5.2 ότι  $\sigma_{\max} = \sigma_p \cong 345\text{MPa}$ . Έτσι για ακόμη μία φορά παρατηρούνται αδυναμίες του μοντέλου.

### 5.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Έπειτα από την παρατήρηση των διαγραμμάτων μας, έγινε μία προσπάθεια να μελετηθούν οι μεταβολές που επιφέρουν οι αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους που υπάρχουν στις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση.

Πρώτη αλλαγή που έγινε, ήταν να μεταβληθούν οι χρόνοι  $t_p$  στα αρχικά βήματα του κώδικα μοντελοποίησης. Αυτό έγινε διότι όταν βρέθηκαν με χάρακα και στυλό τα ζεύγη  $(\sigma, t)$  από τα διαγράμματα 3.3.a,b, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές  $t_p$  είναι διαφορετικές από αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 ενώ αντιθέτως οι τιμές  $\sigma_p$  παρατηρήθηκε ότι είναι όμοιες με αυτές του πίνακα 3.1. Οι τιμές αυτές είναι οι εξής:

$t_p = \{135, 577, 7000, 6000, 55000, 320000, 600000, 880000, 4900000\}$  αντί για

$t_p = \{135, 577, 2491, 5557, 20700, 142000, 360000, 780000, 4330000\}$  όπως

δίνονται στο άρθρο. Από τις 8 θερμοκρασίες καθίζησης που

χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίησή μας, για τη θερμοκρασία

καθίζησης  $T=232^\circ\text{C} \Rightarrow t_p = 577\text{sec}$  τόσο στο άρθρο όσο και στις τιμές

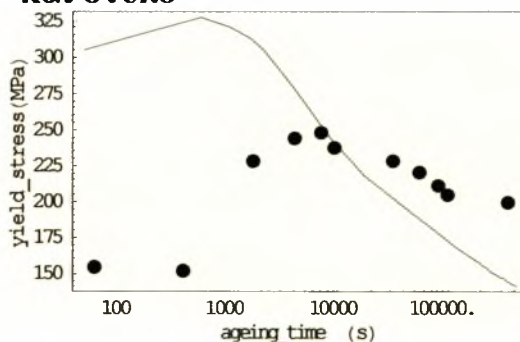
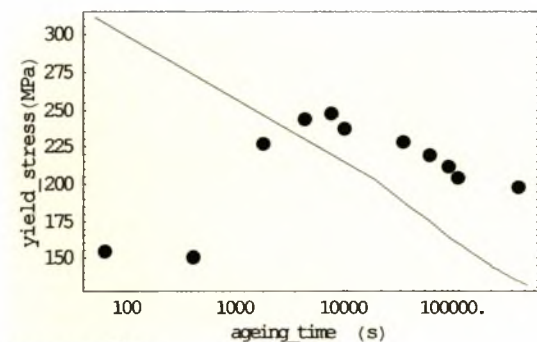
που βρέθηκαν με χάρακα και στυλό, έτσι δεν επέρχεται κάποια

μεταβολή. Στις υπόλοιπες 7 θερμοκρασίες παρουσιάζονται παρακάτω 7

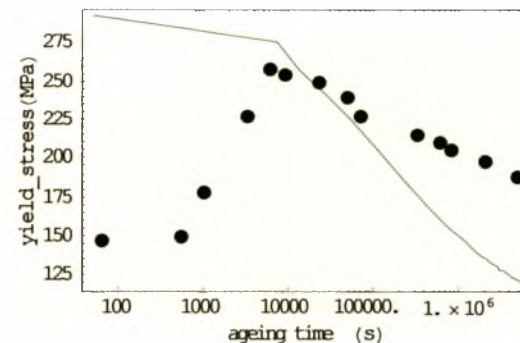
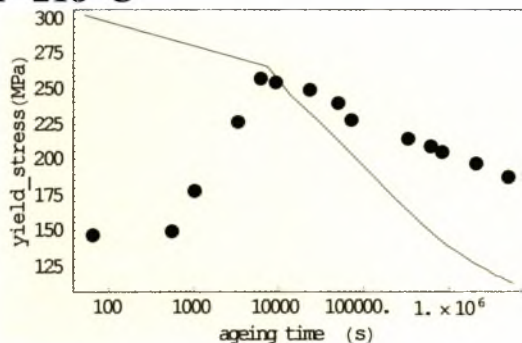
διαγράμματα τα οποία συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες που είχαν διεξαχθεί αρχικά από τη μοντελοποίησή μας.

Για  $t_p$  που δίνονται στο άρθρο

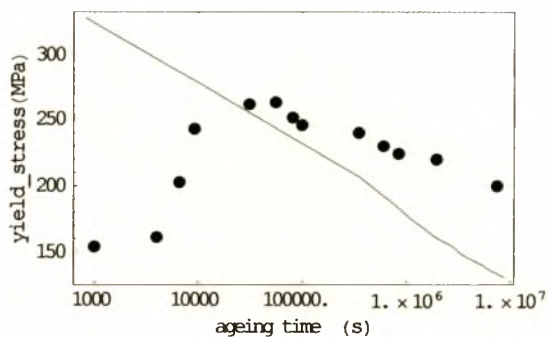
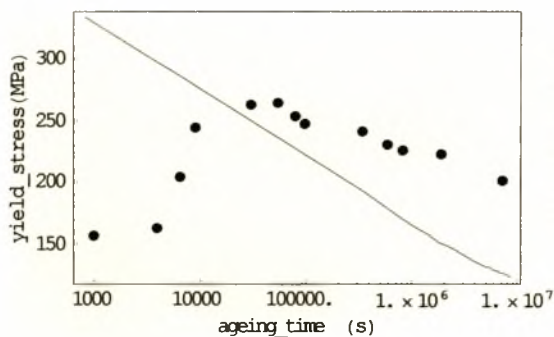
Για  $t_p$  που βρέθηκαν με χάρακα και στυλό



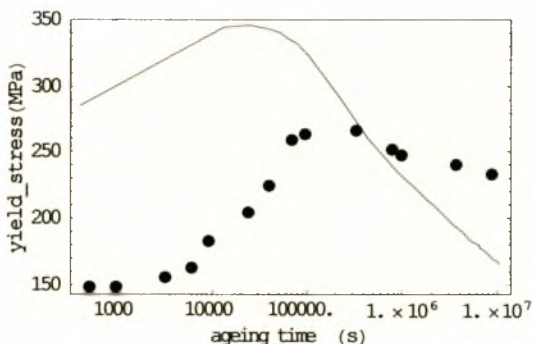
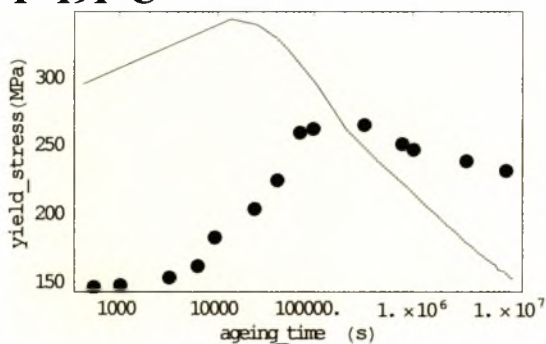
$T=218^\circ\text{C}$



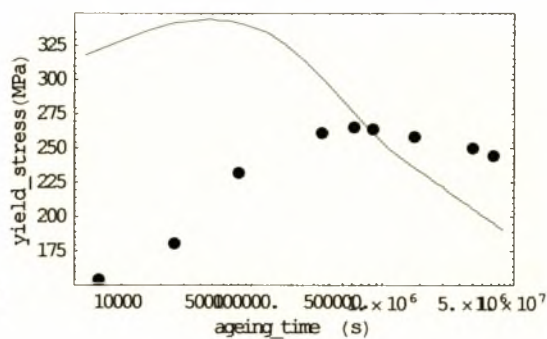
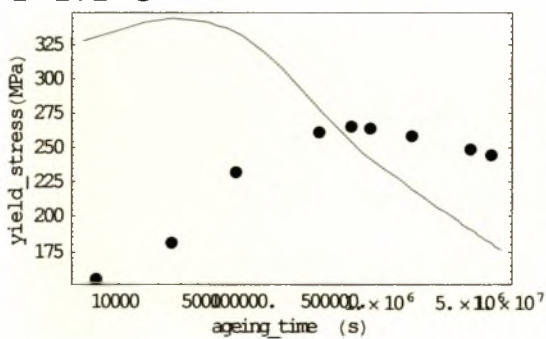
$T=204^\circ\text{C}$



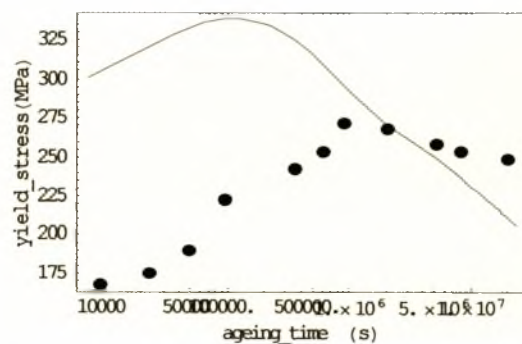
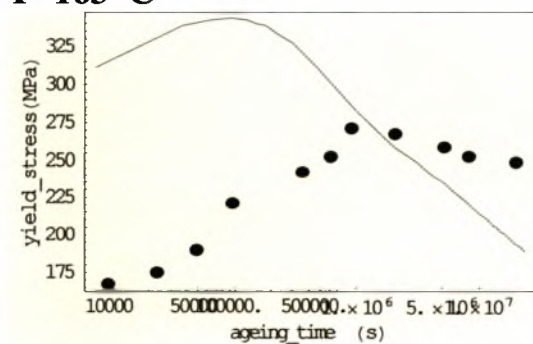
**$T=191^{\circ}\text{C}$**



**$T=171^{\circ}\text{C}$**

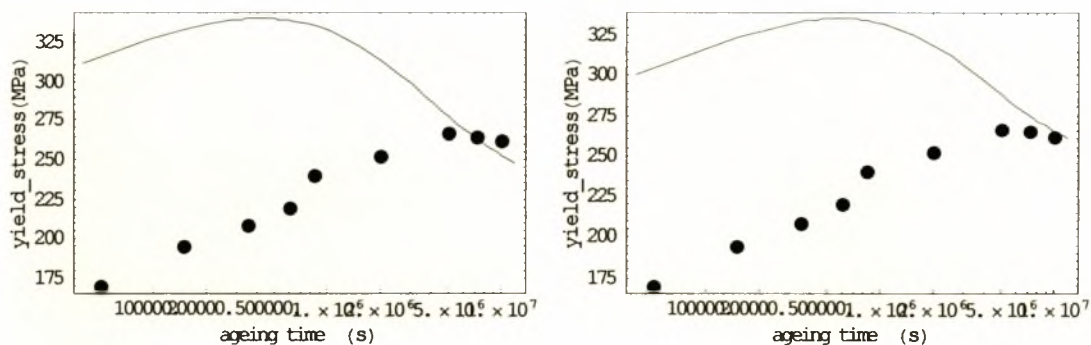


**$T=163^{\circ}\text{C}$**



**$T=149^{\circ}\text{C}$**





**T=135°C**

**Σχήμα 5.3** Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών ( $\sigma, t$ ) για θερμοκρασίες καθίζησης  $T=218, 204, 191, 171, 163, 149, 135^\circ\text{C}$ , έχοντας αριστερά τις τιμές  $t_p$  του άρθρου και δεξιά τις τιμές που βρέθηκαν με χάρακα και στυλό.

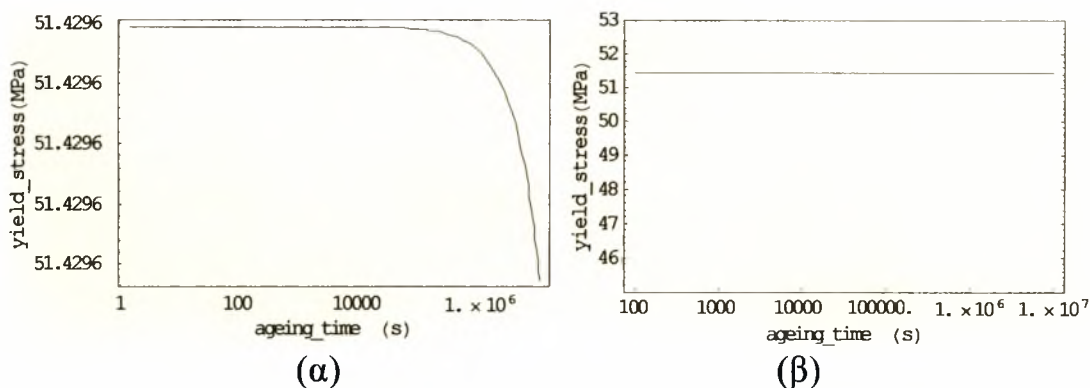
Παρατηρείται σε όλες τις θερμοκρασίες καθίζησης μια μετατόπιση της καμπύλης  $\sigma(t)$  προς τα δεξιά και κατά συνέπεια ένα «πλησίασμα» με τα δεδομένα ζεύγη ( $\sigma, t$ ) στην «ουρά».

Δεύτερη αλλαγή που έγινε, ήταν να αντικατασταθούν στον κώδικά μας οι τιμές των  $Q_s$ ,  $T_s$  και  $(S_o)_{\max}$  με τις τιμές που υπάρχουν στο άρθρο (Δείτε πίνακα 3.1). Παρατηρήθηκε όμως ότι αυτή η αλλαγή δεν επέφερε καμία αλλαγή στα διαγράμματά μας.

## 5.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΡΟΗΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΩΝ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ.

Στην προσπάθεια βελτίωσης του μοντέλου Ashby, ένας από τους στόχους της εργασίας, προστέθηκε ένας επιπλέον όρος στο όριο ροής. Ο όρος αυτός,  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ , δείχνει την ισχυροποίηση ενός κράματος λόγω των συνόρων των κόκκων (δείτε κεφάλαιο 4.3). Ο όρος αυτός είναι σημαντικός στην ισχυροποίηση των κραμάτων και δεν είναι κατανοητός ο λόγος που παραλήφθηκε στο άρθρο Ashby. Έτσι αφού προστέθηκαν κάποια επιπλέον βήματα στον κώδικα του Mathematica εξήχθησαν τα παρακάτω διαγράμματα:



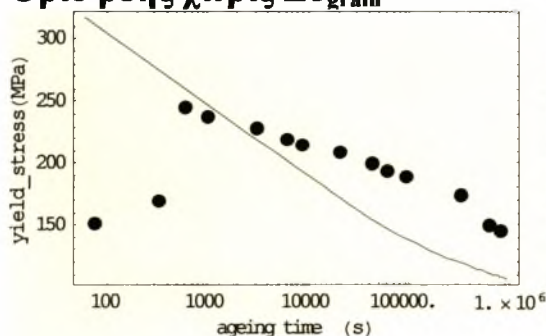


**Σχήμα 5.4 (α)** Διάγραμμα ( $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ ) ισχυροποίησης λόγω διαμέτρου των κόκκων με μικρό εύρος τιμών στον άξονα y, **(β)** Διάγραμμα ( $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ ) ισχυροποίησης λόγω διαμέτρου των κόκκων με μεγαλύτερο εύρος τιμών.

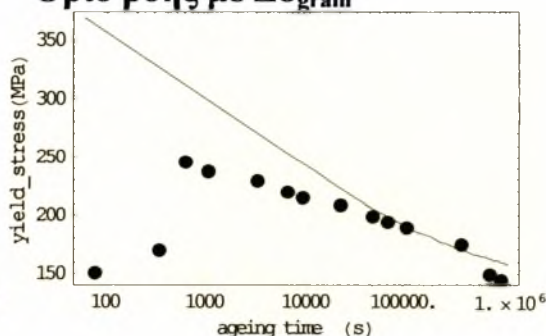
Η εξάρτηση του  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$  μόνο από το χρόνο t, όπως φαίνεται και στον τύπο  $\Delta\sigma_{\text{grain}} = k_y * [(\overline{D_o}^2 + k * t)^{1/2}]^{-1/2}$ , μας δηλώνει πως το διάγραμμα στο Σχήμα 5.4(α) είναι ίδιο για όλες τις θερμοκρασίες καθίζησης. Αυτό που ουσιαστικά επιτεύχθηκε με την προσθήκη του  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$  ήταν να προστεθεί μία επιπλέον σταθερή τάση στο όριο ροής μας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4.β.

Οι επιπτώσεις στο όριο ροής του κράματος 6061 μετά την προσθήκη της ισχυροποίησης των συνόρων των κόκκων είναι φανερές συγκρίνοντας την κάθε καμπύλη ορίου ροής με τις αρχικές καμπύλες του Σχήματος 5.2. Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες ορίου ροής και των δεδομένων ζευγών ( $\sigma, t$ ) για κάθε θερμοκρασία καθίζησης. Αριστερά είναι οι ίδιες καμπύλες του Σχήματος 5.2 ενώ δεξιά οι καμπύλες με τον επιπλέον όρο  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ .

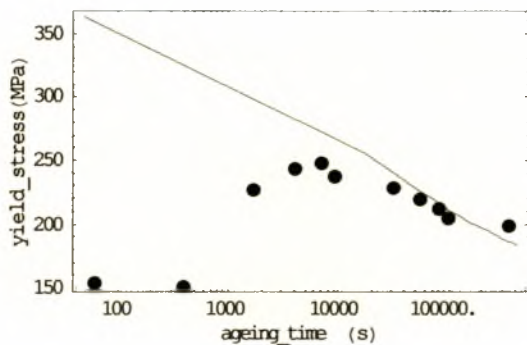
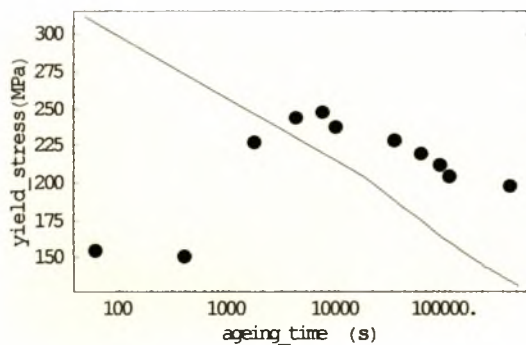
**Όριο ροής χωρίς  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$**



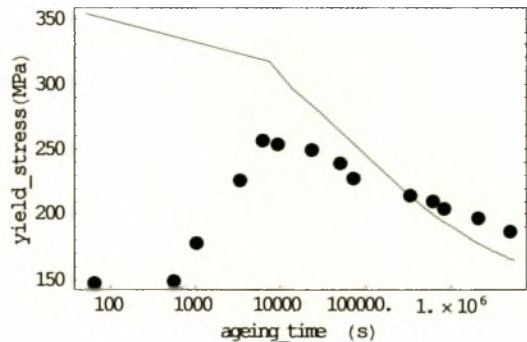
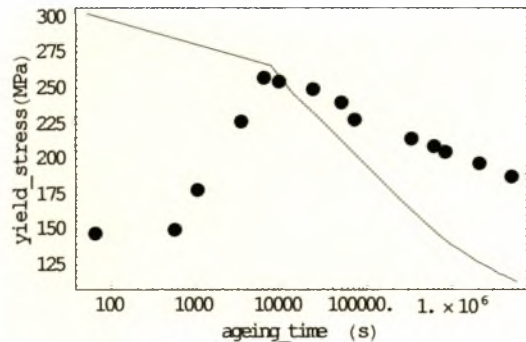
**Όριο ροής με  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$**



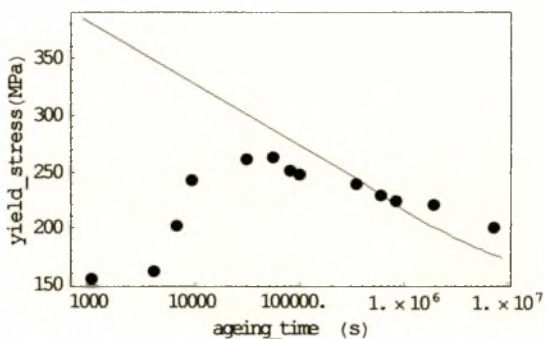
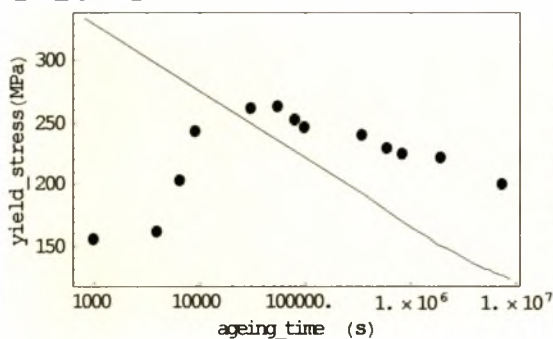
**T=232°C**



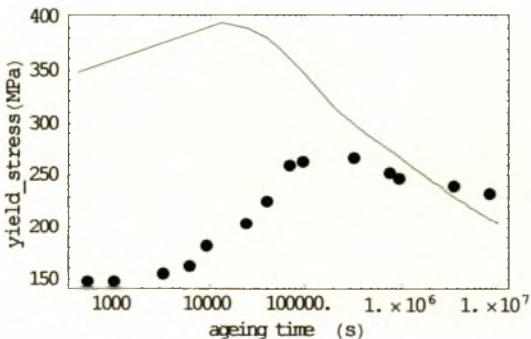
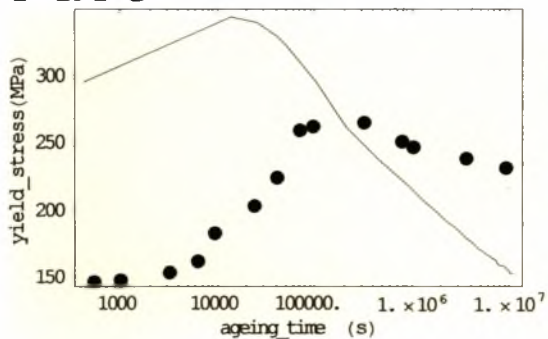
**$T=218^{\circ}\text{C}$**



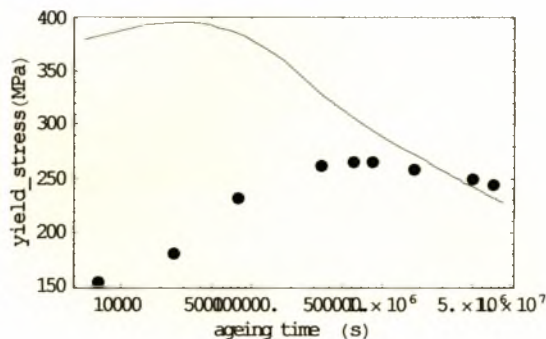
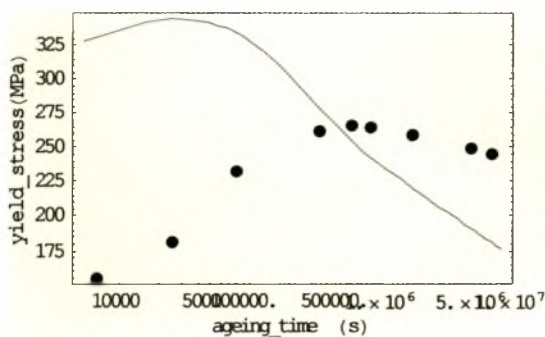
**$T=204^{\circ}\text{C}$**



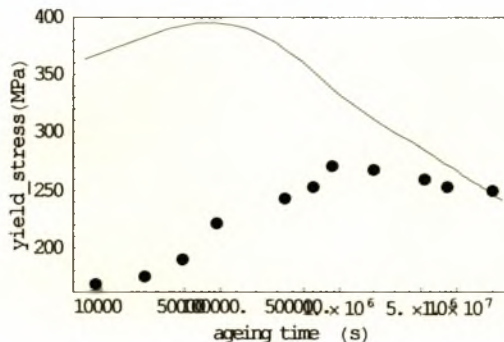
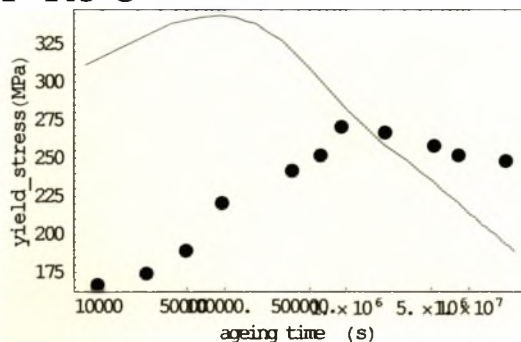
**$T=191^{\circ}\text{C}$**



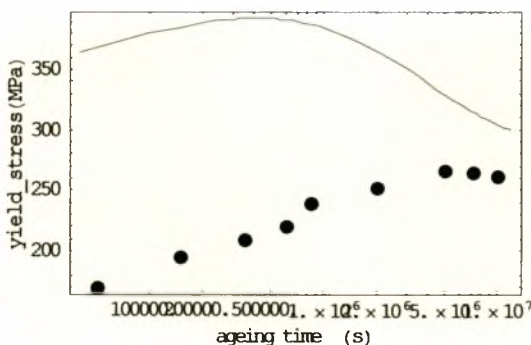
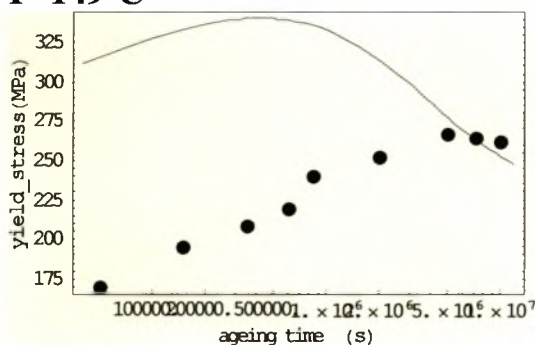
**$T=171^{\circ}\text{C}$**



**T=163°C**



**T=149°C**



**T=135°C**

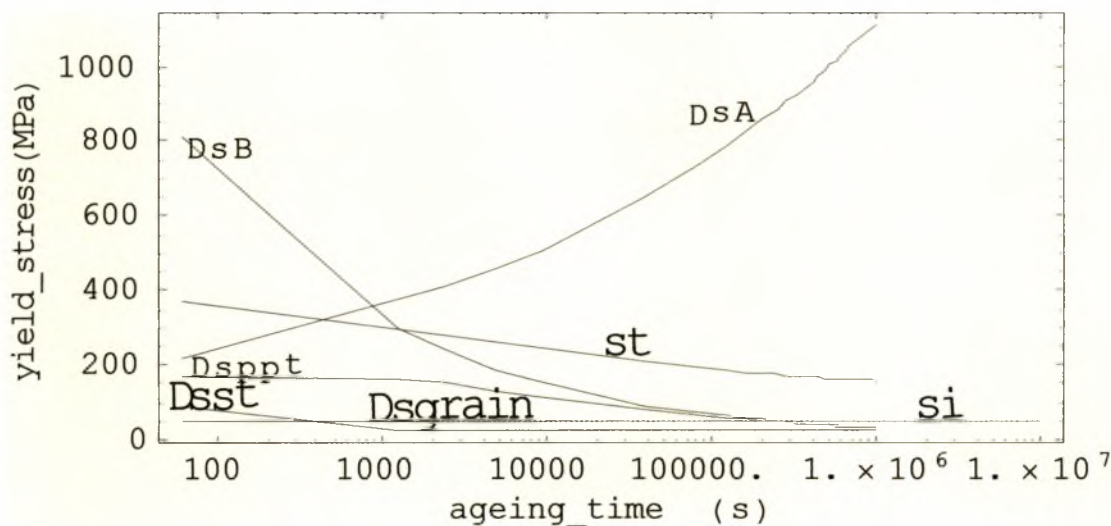
**Σχήμα 5.5** Διαγράμματα ορίου ροής και δεδομένων ζευγών  $(\sigma, t)$  από το Mathematica για διάφορες θερμοκρασίες καθίζησης, έχοντας αριστερά το όριο ροής χωρίς τον όρο  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$  και δεξιά το όριο ροής με  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ .

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι:

- ❖ Όλες οι καμπύλες ορίου ροής  $\sigma(t)$ , στις οποίες έχει προστεθεί ο όρος  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ , πλησιάζουν τα δεδομένα ζεύγη  $(\sigma, t)$  στην «ουρά» τους, δηλαδή οι καμπύλες  $\sigma(t)$  που διεξάγονται, ειδικά για μεγάλους χρόνους καθίζησης, ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.
- ❖ Για χαμηλούς χρόνους καθίζησης οι καμπύλες ορίου ροής  $\sigma(t)$  εξακολουθούν να απέχουν από την πραγματικότητα.
- ❖ Το όριο ροής για κάποιες θερμοκρασίες και χρόνους καθίζησης πλησιάζει τα 400MPa, κάτι το οποίο απέχει πολύ από την

πραγματικότητα μιας και όπως έχει αναφερθεί (κεφάλαιο 5.2) το μεγαλύτερο όριο ροής κορυφής ( $\sigma_p$ ,  $t_p$ ) είναι  $\sigma_p=271,2\text{MPa}$ .

Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρατίθεται επιπλέον το Σχήμα 5.6. Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζονται όλες οι καμπύλες που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος 6061, έχοντας προσθέσει τον όρο ισχυροποίησης λόγω των συνόρων των κόκκων  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ . Η καμπύλη  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$  δεν είναι εμφανής μιας και αριθμητικά είναι μία τάση περίπου ίση με τη  $\sigma_i$ , το όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης, ενώ το όριο ροής  $\sigma(t)$  του κράματος 6061 έχει αυξηθεί κατά  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ , συγκρίνοντάς το με αυτό του σχήματος 5.1(η).



**Σχήμα 5.6** Διάγραμμα με όλες τις καμπύλες που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση του κράματος 6061, έχοντας προσθέσει τον όρο  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$  [για θερμοκρασία καθίζησης  $T=191^\circ\text{C}$ ].



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

#### **6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Έχοντας εφαρμόσει το μοντέλο για την καθίζηση του κράματος 6061 και συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για το μοντέλο Ashby:

- Παρατηρήθηκαν διαφορετικές τιμές σε ορισμένες παραμέτρους των σχέσεων που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση και μάλιστα χωρίς να είναι κατανοητός ο λόγος.
- Οι καμπύλες ορίου ροής για κάθε θερμοκρασία και χρόνο καθίζησης στο άρθρο Ashby είναι πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα ζεύγη( $\sigma, t$ ), τα οποία δείχνουν τι συμβαίνει στην πραγματικότητα στο κράμα 6061-T6. Αντιθέτως στη μοντελοποίησή μας υπάρχουν αποκλίσεις του ορίου ροής από την πραγματικότητα τόσο σε χαμηλούς όσο και σε υψηλούς χρόνους καθίζησης, γεγονός που δείχνει πως υπάρχουν ελλείψεις και αδυναμίες στο μοντέλο Ashby.
- Παρατηρήθηκαν διαφορετικές τιμές  $t_p$  στο Σχήμα 3.3.a.b από αυτές του πίνακα 3.1 χωρίς να είναι κατανοητός ο λόγος και το γεγονός αυτό επιφέρει αλλαγές στις καμπύλες ορίου ροής.
- Παρατηρήθηκε πως στη μοντελοποίηση του άρθρου Ashby παραλήφθηκε η συνεισφορά των συνόρων των κόκκων ( $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ ) στην ισχυροποίηση του κράματος, χωρίς να είναι κατανοητός ο λόγος, μιας και η ισχυροποίηση αυτή είναι σημαντική.
- Προσθέτοντας τον όρο  $\Delta\sigma_{\text{grain}}$ , παρατηρείται πως οι καμπύλες ορίου ροής  $\sigma(t)$  πλησιάζουν τα δεδομένα ζεύγη ( $\sigma, t$ ) στην «ουρά» τους, δηλαδή οι καμπύλες  $\sigma(t)$  που διεξάγονται κατά τη μοντελοποίησή μας και για μεγάλους χρόνους καθίζησης ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.
- Το γεγονός ότι στη μοντελοποίησή μας το όριο ροής για κάποιες θερμοκρασίες και χρόνους καθίζησης πλησιάζει τα 400MPa, κάτι το οποίο απέχει πολύ από την πραγματικότητα, θέτει το ερώτημα εάν είναι σωστό το γεγονός ότι ως συνολικό όριο ροής του κράματος ήταν ένα άθροισμα από όρια ροής, ως συνεισφορά στην ισχυροποίησή του. Μήπως οι διάφοροι μηχανισμοί ισχυροποίησης δε λειτουργούν ανεξάρτητα αλλά υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ τους;



## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η εφαρμογή του άρθρου του Ashby με χρήση του προγράμματος Mathematica, ήταν ένα πρώτο βήμα για τη μοντελοποίηση των κραμάτων αλουμινίου σειράς 6XXX ισχυροποιημένων με καθίζηση, βήμα το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει κίνητρο για περαιτέρω έρευνα. Για το σκοπό αυτό προτείνονται τα εξής:

- a. Χρήση προγράμματος, διαφορετικού από αυτό του Mathematica, ώστε να αποφευχθούν τα προβλήματα γραμμικοποίησης των ισόθερμων καμπυλών κατά τη χρήση μεγάλων χρόνων καθίζησης.
- b. Μελέτη κραμάτων σειράς 6000 με θερμοκρασίες καθίζησης πάνω από τη μετασταθή θερμοκρασία solvus [1].
- c. Εφαρμογή του μοντέλου και σε κράματα σειράς 7XXX, στα οποία η καθίζηση είναι αργή διότι γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κι εμφανίζονται περισσότερες της μία κορυφής στην ισόθερμη καμπύλη καθίζησης, στην αλληλουχία καθίζησης δηλαδή εμπλέκονται πολλά στάδια.
- d. Λόγω του ότι οι θερμικές κατεργασίες στην αγορά είναι σπάνια ισοθερμικές, να υπάρξει εφαρμογή μοντέλου που θα προβλέπει την αντοχή των θερμοεπηρρεαζόμενων ζωνών των συγκολλήσεων [2].
- e. Δημιουργία του μοντέλου χωρίς τη χρήση πειραματικών δεδομένων (των ζευγών  $(\sigma, t)$ ).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

### α. ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASHBY

**$A_0$  [wt%]** σταθερά συγκέντρωσης διαλυτού μέρους (solute concentration constat)

**$C_1..C_4$**  σταθερές υλικού, στις οποίες δεν έχει δοθεί αριθμητική τιμή (στον τύπο) (material constants, which are not evaluated) (various units)

**$G$  [GPa]** συντελεστής διάτμησης του κράματος (shear modulus of the alloy)

**$K_1$**  σταθερά (calibration), η οποία ελέγχει τη σταθερά ρύθμισης του χρόνου  $\tau_1$  (calibration constant, controlling time constant  $\tau_1$ )

**$P$  [s/K]** διορθωμένος της θερμοκρασίας χρόνος (temperature-corrected time)

**$P_p, P_{pe}$  [s/K]** διορθωμένος της θερμοκρασίας χρόνος κορυφής (χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία) (peak temperature-corrected time) (low and high temp.)

**$P^*$**  διορθωμένος της θερμοκρασίας χρόνος (χωρίς διαστάσεις μονάδες) (dimensionless temperature-corrected time)

**$Q_A$  [J/mol]** ενέργεια ενεργοποίησης για καθίζηση (activation energy for ageing)

**$Q_e, Q_s$  [J/mol]** ελεύθερη ενέργεια του διαλύματος (free energy of solution/high and low temperature solvi)

**$R$  [8.314 J/mol·K]** παγκόσμια σταθερά αερίων

**$S_o, S_{oe}$  [VPN ή MPa]** παράμετρος ισχυροποίησης λόγω καθίζησης (precipitation strength parameter/ low and high temperature)

**$T$  [°C ή K]** θερμοκρασία

**$T_c$  [°C ή K]** θερμοκρασία μετάβασης (transition temperature)

**$T_e, T_s$  [°C ή K]** (solvus temperature/ high and low temperature)

**$b$  [nm]** διάνυσμα burgers των γραμμοαταξιών

**$C_s$  [wt%]** συγκέντρωση του κράματος (concentration of the alloy)

**$\bar{C}$  [wt%]** μέση συγκέντρωση διαλυτού στον πίνακα (mean solute concentration in the matrix)

**$c_1..c_4$**  σταθερές του υλικού

**$f$**  κλάσμα όγκου καθίζησης (volume fraction of precipitate)

**$f_o$**  τελικό κλάσμα όγκου (final equilibrium volume fraction of precipitate)

**l [nm]** μέση απόσταση (διάστημα) σωματιδίου (mean particle spacing)  
**m,n** εκθέτες στα f και r, στην εξίσωση διάτμησης του  
 σωματιδίου(exponents on f and r in particle shearing equation)  
**r [μm]** μέση ακτίνα σωματιδίου (mean particle radius)

**t [s]** time – χρόνος

**tp [s]** χρόνος κατά την κορυφή της χαμηλής καθίζησης

**$\sigma_i$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης (intrinsic yield strength)

**$\sigma_{oa}$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω υπεργήρανσης (=μείωση της σκληρότητας κατά τη γήρανση που οφείλεται στη διεύρυνση της διασποράς) (overaged yield strength)

**$\sigma_p$  [VPN ή MPa]** όριο ροής κορυφής (peak yield strength)

**$\sigma_q$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω βαφής (as-quenched yield strength)

**$\tau_1$  [s]** εκθετική σταθερά χρόνου (exponential time constant)

**$\Delta\sigma_{ppt}$  [VPN ή MPa]** αύξηση τάσης, λόγω καθίζησης στο πλέγμα (net precipitation strength increment)

**$\Delta\sigma_{ss}$  [VPN ή MPa]** αύξηση ορίου ροής λόγω στερεού διαλύματος (solid-solution increment of yield strength)

**$\Delta\sigma_A$  [VPN ή MPa]** ισχυροποίηση συνοχής (διαπερατών σωματιδίων) (precipitation strength increment) – (particle shearing)

**$\Delta\sigma_B$  [VPN ή MPa]** ισχυροποίηση Orowan (μη διαπερατών σωματιδίων) (precipitation strength increment) – (particle shearing)

## b. ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ MATHEMATICA

**sq=  $\sigma_q$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω βαφής (as-quenched yield strength)

**si=  $\sigma_i$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω πλεγματικής αντίστασης (intrinsic yield strength)

**soaest= ( $\sigma_{oa}$ )<sub>est</sub> [VPN ή MPa]** Υπολογισμένο όριο ροής λόγω υπεργήρανσης

**R=R[8.314 J/mol·K]** παγκόσμια σταθερά αερίων

**T=T[°K]** θερμοκρασία

**T1=T[°C]** θερμοκρασία

**tp= tp [s]** χρόνος κατά την κορυφή της χαμηλής καθίζησης

**sp=  $\sigma_p$  [VPN ή MPa]** όριο ροής κορυφής (peak yield strength)

**Qa=  $Q_A$  [J/mol]** ενέργεια ενεργοποίησης για καθίζηση (activation energy for ageing)

**So=  $S_o, S_{oe}$  [VPN ή MPa]**παράμετρος ισχυροποίησης λόγω καθίζησης (precipitation strength parameter/ low and high temperature)

**soa=  $\sigma_{oa}$  [VPN ή MPa]** όριο ροής λόγω υπεργήρανσης (=μείωση της σκληρότητας κατά τη γήρανση που οφείλεται στη διεύρυνση της διασποράς) (overaged yield strength)

**soanew=**Μέσος όρος των  $\sigma_{oa}$

=η τελική τιμή soanew μετά το bestfit

**So2max=(  $S_o$  )<sup>2</sup><sub>max</sub>**

**Somax=(  $S_o$  )<sub>max</sub>**

**Qs=  $Q_s$  [J/mol]**ελεύθερη ενέργεια του διαλύματος (free energy of solution low temperature solvi)

**Ts=  $T_s$  [ $^{\circ}$  C ή K]**(solvus temperature low temperature)

**P=  $P$  [s/k]** διορθωμένος της θερμοκρασίας χρόνος (temperature-corrected time)

**Pp=  $P_p$  [s/k]**διορθωμένος της θερμοκρασίας χρόνος κορυφής (χαμηλή θερμοκρασία) (peak temperature-corrected time) (low temp.)

**tt= $\tau_1$  [s]** εκθετική σταθερά χρόνου (exponential time constant)

**Dsssi= $\Delta\sigma_{ssi}=\sigma_q -\sigma_i$**

**Dssso= $\Delta\sigma_{sso}=\sigma_{Oa}-\sigma_i$**

**Dsst=  $\Delta\sigma_{ss}$  [VPN ή MPa]**αύξηση ορίου ροής λόγω στερεού διαλύματος (solid-solution increment of yield strength)

**Dsppt=  $\Delta\sigma_{ppt}$  [VPN ή MPa]**αύξηση τάσης, λόγω καθίζησης στο πλέγμα (net precipitation strength increment)

**DsA=  $\Delta\sigma_A$  [VPN ή MPa]**ισχυροποίηση συνοχής (διαπερατών σωματιδίων) (precipitation strength increment) – (particle shearing)

**DsB=  $\Delta\sigma_B$  [VPN ή MPa]**ισχυροποίηση arowan (μη διαπερατών σωματιδίων)(precipitation strength increment) – (particle shearing)

**st=  $\sigma(t)$ [VPN ή MPa]** όριο ροής κράματος

**c. ΠΑΡΑΜΕΤΡΕΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥ**  
**ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ**

$\overline{D}$  [  $\mu\text{m}$  ] μέση διάμετρος των κόκκων

$\overline{D_0}$  [  $\mu\text{m}$  ] αρχική μέση διάμετρος των κόκκων

$t$  [ sec ] χρόνος

$t_0$  [ sec ] χρόνος=μηδέν

$k$  [  $\mu\text{m}/\text{sec}$  ] συντελεστής

$M$  κινητικότητα των συνόρων των κόκκων (εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία)

$\gamma$  [  $\text{J}/\text{m}^2$  ] επιφανειακή ενέργεια

$V_m$  [  $\text{m}^3/\text{mol}$  ] ο ατομικός όγκος

$d$  [  $\mu\text{m}$  ] μέση διάμετρος των κόκκων

$k_y$  [  $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$  ] συντελεστής Hall-Petch

$D_{\text{grain}} = \Delta\sigma_{\text{grain}}$  [ MPa ] ισχυροποίηση λόγω των συνόρων των κόκκων



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**  
**ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ MATHEMATICA**

a. Αρχικός κώδικας στο Mathematica (σύμφωνα με το άρθρο Ashby)

```
Clear["Global`*"];
```

```
sq=155
```

```
155
```

```
si=53
```

```
53
```

```
soaest=(sq+si)/2
```

```
104
```

```
R=0.0083143;
```

```
T1={260.,232.,218.,204.,191.,171.,163.,149.,135.}
```

```
{260.,232.,218.,204.,191.,171.,163.,149.,135.}
```

```
T=T1+273.15;
```

```
T//MatrixForm
```

```
{ 533.15  
 505.15  
 491.15  
 477.15  
 464.15  
 444.15  
 436.15  
 422.15  
 408.15 }
```

```
tp={135,577,2491,5557,20700,142000,360000,780000,4330000  
}
```

```
{135,577,2491,5557,20700,142000,360000,780000,4330000}
```

```
tp//MatrixForm
```

```
{ 135  
 577  
 2491  
 5557  
 20700  
 142000  
 360000  
 780000  
 4330000 }
```

**sp={211.1,245.6,247.7,258.1,263.6,266.6,266.3,271.2,266.3}**  
**{211.1,245.6,247.7,258.1,263.6,266.6,266.3,271.2,266.3}**

**sp//MatrixForm**

$\begin{pmatrix} 211.1 \\ 245.6 \\ 247.7 \\ 258.1 \\ 263.6 \\ 266.6 \\ 266.3 \\ 271.2 \\ 266.3 \end{pmatrix}$

**N[tp/T]**

**{0.253212,1.14223,5.07177,11.6462,44.5977,319.712,825.404,1847.68,10608.8}**

**y=N[Log[tp/T]]**

**{-1.37353,0.132987,1.62369,2.45498,3.79768,5.76742,6.71587,7.52169,9.26944}**

**x=N[1000/T]**

**{1.87564,1.97961,2.03604,2.09578,2.15448,2.25149,2.29279,2.36883,2.45008}**

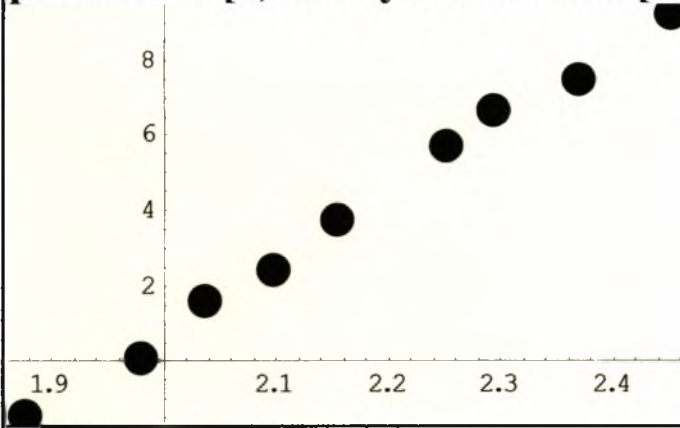
**a=Table[{x[[i]],y[[i]]},{i,1,9}]**

**{{1.87564,-1.37353},{1.97961,0.132987},{2.03604,1.62369},{2.09578,2.45498},{2.15448,3.79768},{2.25149,5.76742},{2.29279,6.71587},{2.36883,7.52169},{2.45008,9.26944}}**

**a//MatrixForm**

$\begin{pmatrix} 1.87564 & -1.37353 \\ 1.97961 & 0.132987 \\ 2.03604 & 1.62369 \\ 2.09578 & 2.45498 \\ 2.15448 & 3.79768 \\ 2.25149 & 5.76742 \\ 2.29279 & 6.71587 \\ 2.36883 & 7.52169 \\ 2.45008 & 9.26944 \end{pmatrix}$

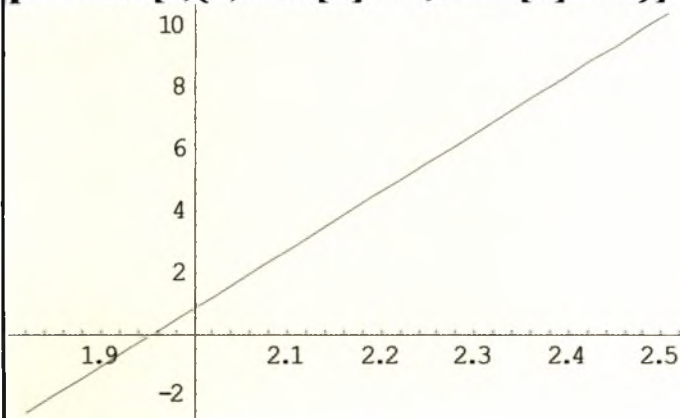
**p1=ListPlot[a,PlotStyle->PointSize[0.05]]**



**s=Fit[a,{1,z},z]**  
**-36.9549+18.8931 z**

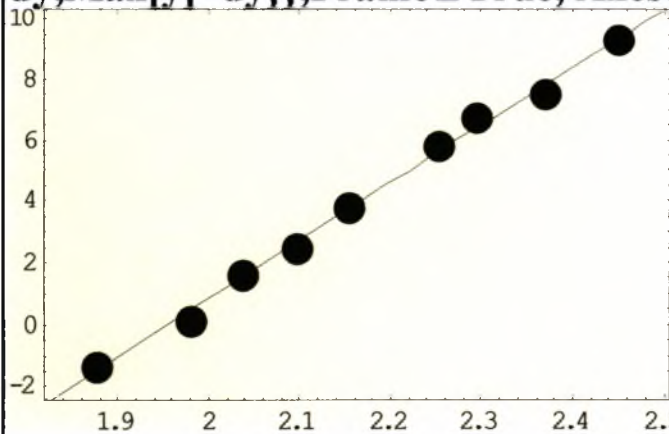
**dx=.1\*(Max[x]-Min[x])**  
**dy=.1\*(Max[y]-Min[y])**  
**0.0574435**  
**1.0643**

**p2=Plot[s,{z,Min[x]-dx,Max[x]+dx}]**



☐ Graphics

**Show[p1,p2,PlotRange->{{Min[x]-dx,Max[x]+dx},{Min[y]-dy,Max[y]+dy}},Frame->True,Axes->False]**



☐ Graphics

```
Qa=s[[2,1]]*R*10^3
```

```
157.083
```

```
W=Table[(tp/T)*Exp[-Qa/(R*T)]]
```

```
{1.0316×10-16, 6.52727×10-17, 9.98013×10-17, 7.41297×10-17, 9.3645×10-17, 1.07375×
```

```
Pp=Mean[W]
```

```
9.12967×10-17
```

```
sg=soaest
```

```
Do[
```

```
  So=sp-sg;
```

```
  w=So^2;
```

```
  v=T1;
```

```
  b=Table[{v[[i]],w[[i]]},{i,1,9}];
```

```
p3=ListPlot[b,PlotStyle□PointSize[0.05],DisplayFunction□Identity];
```

```
ww=u1*(1-Exp[-u2*(1/vv-1/u3)]);
```

```
sol=FindFit[b,ww,{{u1, 289000},{u2, 3240},{u3,280}},vv];
```

```
dv=.1*(Max[v]-Min[v]);
```

```
dw=.1*(Max[w]-Min[w]);
```

```
p4=Plot[ww/.sol,{vv,Min[v]-  
dv,Max[v]+dv},DisplayFunction□Identity];
```

```
figure=Show[p3,p4,PlotRange□ {{Min[v]-  
dv,Max[v]+dv},{Min[w]-dw,Max[w]+dw}},Frame□ True,  
Axes□ False,DisplayFunction□ Identity];
```

```
So2max=sol[[1,2]];
```

```
Qs=sol[[2,2]]*R;
```

```
Ts=sol[[3,2]];
```

```
Somax=Sqrt[So2max];
```

**T=T1;**

**soa=si+(sq-si)\*Exp[(-2Qs/(3\*R))\*(1/T-1/Ts)];**

**soanew=Mean[soa] ;**

**Print[sg]**

**Print[soanew]**

**If[sg-soanew<=.05, Break[], sg=soanew ] ;**  
**,{10}]**

104

*General::spell1 : Possible spelling error: new symbol name "Somax" is similar to*

104

77.4973

77.4973

75.2558

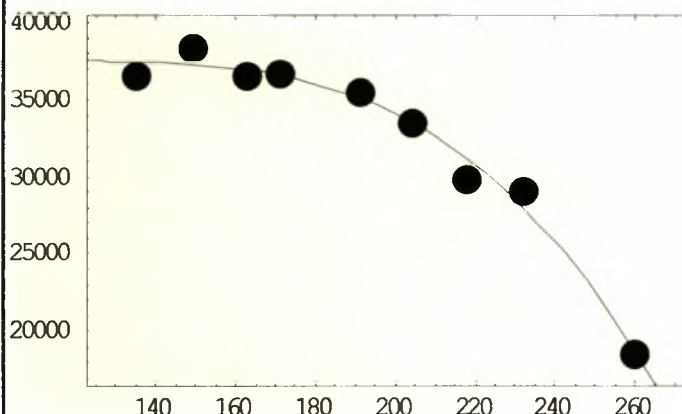
75.2558

75.0892

75.0892

75.0769

**Show[figure,PlotRange->{{Min[v]-dv,Max[v]+dv},{Min[w]-dw,Max[w]+dw}},Frame->True,**  
**Axes->False,DisplayFunction->\$DisplayFunction];**



**So2max**



<b>Qs</b> <b>Ts</b> <b>Somax</b> 37572.9 12.1699 296.052 193.837
<b>sg</b> <b>soanew</b> 75.0892 75.0769
<b>Dsssi=sq-si</b> 102
<b>Dssso=soanew-si</b>
22.0769
<b>K1=0.5</b> 0.5
<b>data[1]={}</b> {}
<b>data[2]={</b> {75,152},{320,170},{577,245.6},{990,238},{3100,230} ,{6000,220},{8600,215},{20*(10^3),210},{43000,200},{60000,1 95},{90*(10^3),190},{320*(10^3),175},{600*(10^3),150},{800 *(10^3),145}} {{75,152},{320,170},{577,245.6},{990,238},{3100,230},{600 0,220},{8600,215},{20000,210},{43000,200},{60000,195},{90 000,190},{320000,175},{600000,150},{800000,145}}
<b>data[3]={</b> {62,155},{390,152},{1700,228},{4000,244},{7000,247 .7},{9000,238},{31000,229},{55000,220},{80000,212},{99000,2 05},{350000,199}} {{62,155},{390,152},{1700,228},{4000,244},{7000,247.7},{9 000,238},{31000,229},{55000,220},{80000,212},{99000,205}, {350000,199}}

**data[4]={{62,148},{550,150},{990,178},{3200,227},{6000,258.1},{9000,255},{22000,250},{48000,240},{70000,228},{320000,215},{600000,210},{830000,205},{2000000,198},{4800000,188}}**  
 {{62,148},{550,150},{990,178},{3200,227},{6000,258.1},{9000,255},{22000,250},{48000,240},{70000,228},{320000,215},{600000,210},{830000,205},{2000000,198},{4800000,188}}

**data[5]={{1000,155},{3900,162},{6500,203},{9000,243},{30000,262},{55000,263.6},{80000,252},{99000,247},{350000,240},{600000,230},{840000,225},{1900000,221},{7200000,200}}**  
 {{1000,155},{3900,162},{6500,203},{9000,243},{30000,262},{55000,263.6},{80000,252},{99000,247},{350000,240},{600000,230},{840000,225},{1900000,221},{7200000,200}}

**data[6]={{530,148},{980,149},{3200,155},{6100,163},{9200,183},{24000,205},{40000,225},{70000,260},{95000,263},{320000,266.6},{780000,252},{990000,248},{3600000,240},{8900000,233}}**  
 {{530,148},{980,149},{3200,155},{6100,163},{9200,183},{24000,205},{40000,225},{70000,260},{95000,263},{320000,266.6},{780000,252},{990000,248},{3600000,240},{8900000,233}}

**data[7]={{6500,155},{25000,181},{80000,232},{350000,262},{600000,266.3},{850000,265},{1800000,259},{5000000,250},{7200000,245}}**  
 {{6500,155},{25000,181},{80000,232},{350000,262},{600000,266.3},{850000,265},{1800000,259},{5000000,250},{7200000,245}}

**data[8]={{8900,168},{23000,175},{48000,190},{95000,222},{350000,243},{600000,253},{880000,271.2},{2000000,268},{5200000,259},{8100000,253},{20000000,249}}**  
 {{8900,168},{23000,175},{48000,190},{95000,222},{350000,243},{600000,253},{880000,271.2},{2000000,268},{5200000,259},{8100000,253},{20000000,249}}

```
data[9]={50000,170},{150000,195},{350000,209},{600000,220},
{840000,240},{2000000,252},{4900000,266.3},{7200000,265},
{10000000,262}}
{{50000,170},{150000,195},{350000,209},{600000,220},{840000,240},
{2000000,252},{4900000,266.3},{7200000,265},{10000000,262}}
```

Dsppt  
Dsppt

p5  
p5

<< Graphics`Graphics`

Do[

T=T1[[j]];

So=sp[[j]]-soanew;

T=T1[[j]]+273.15;

P=(t/T)\*Exp[-Qa/(R\*T)];

Pp=Mean[W];

T=T1[[j]];

tt=K1\*tp[[j]];

Dsst=((Dssso^(3/2)+(Dsssi^(3/2)-Dssso^(3/2))\*Exp[-t/tt]))^(2/3);

Dsppt=(2\*So\*((P/Pp)^(1/6)))/(1+(P/Pp)^(1/2));

DsA=2\*So\*((P/Pp)^(1/6));

DsB=(2\*So)/((P/Pp)^(1/3));

st=si+Dsst+Dsppt;

p5=LogLinearPlot[si,{t,.8\*data[j][[1,1]],1.2\*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];

```

p6=LogLinearPlot[Dsst,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j]][[1]]},PlotRange□All];

p7=LogLinearPlot[DsA,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j]][[1]]},PlotRange□All];

p8=LogLinearPlot[DsB,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j]][[1]]},PlotRange□All];

p9=LogLinearPlot[Dsppt,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j]][[1]]},PlotRange□All];

p10=LogLinearPlot[st,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j]][[1]]},PlotRange□All];
Show[p5,p6,p7,p8,p9,p10, PlotRange□All];

p11=LogLinearListPlot[data[j],PlotStyle□PointSize[0.03]];
Show[p11,p10,PlotRange□All,Axes□False,Frame□True];
,{j,2,9}]

```

b. **Κώδικας στο Mathematica λόγω συνεισφοράς των συνόρων των κόκκων στην ισχυροποίηση.**

Με την προσθήκη του όρου των συνόρων των κόκκων ως συνεισφορά στην ισχυροποίηση, δεν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στο πρόγραμμα του Mathematica παρά μόνο στο τέλος του προγράμματος. Γι'αυτό και παρουσιάζουμε μόνο τα τελευταία βήματα.

```
<< Graphics`Graphics`
```

```
Do[
```

```
  T=T1[[j]];
```

```
  So=sp[[j]]-soanew;
```

```
  T=T1[[j]]+273.15;
```

```
  P=(t/T)*Exp[-Qa/(R*T)];
```

```
  Pp=Mean[W];
```

```
  T=T1[[j]];
```

```
  tt=K1*tp[[j]];
```

```
  Dsst=((Dssso^(3/2)+(Dsssi^(3/2)-Dssso^(3/2))*Exp[-  
t/tt]))^(2/3);
```

```
  Dsppt=(2*So*((P/Pp)^(1/6)))/(1+(P/Pp)^(1/2));
```

```
  DsA=2*So*((P/Pp)^(1/6));
```

```
  DsB=(2*So)/((P/Pp)^(1/3));
```

```
  Dsgrain=(0.23*(10^6))/Sqrt[Sqrt[(20*(10^6))^2+(1313*(10^  
(-6))*t)]];
```

```
  st=si+Dsst+Dsppt+Dsgrain;
```



```
p5=LogLinearPlot[si,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
p6=LogLinearPlot[Dsst,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
p7=LogLinearPlot[DsA,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
p8=LogLinearPlot[DsB,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
p9=LogLinearPlot[Dsppt,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
p12=LogLinearPlot[Dsgrain,{t,1,10^7},PlotRange->All];
```

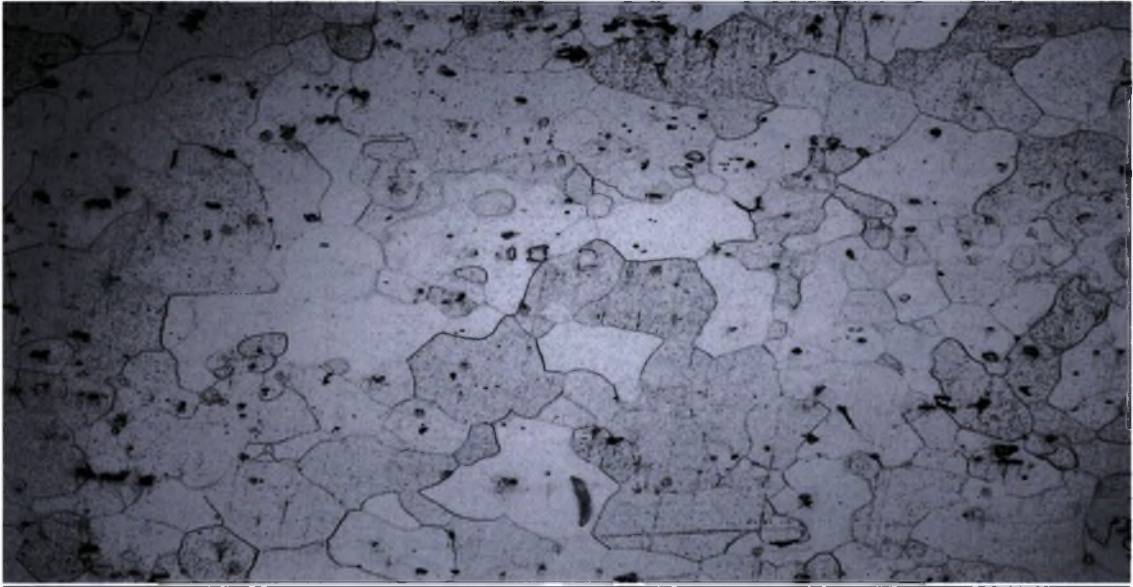
```
p10=LogLinearPlot[st,{t,.8*data[j][[1,1]],1.2*Last[data[j][[1,1]]],PlotRange->All];
```

```
Show[p5,p6,p7,p8,p9,p10,p12, PlotRange->All];
```

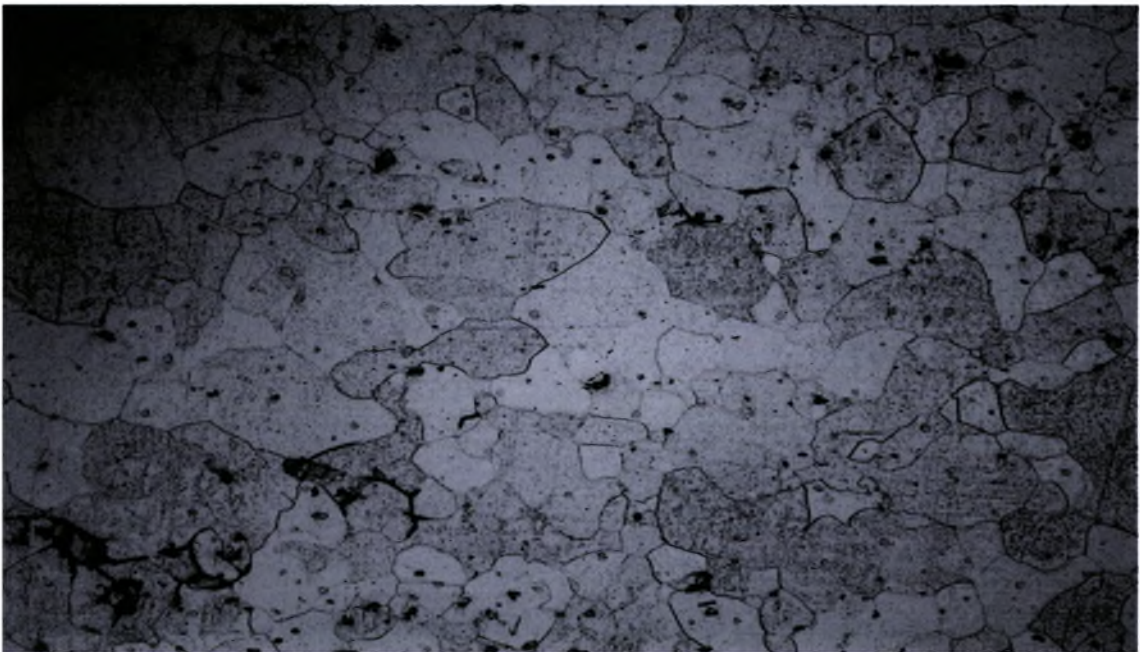
```
p11=LogLinearListPlot[data[j],PlotStyle->PointSize[0.03]];
Show[p11,p10,PlotRange->All,Axes->False,Frame->True];
,{j,2,9}]
```

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**  
**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 6061 ΕΛΑΤΟ**

**Δοκίμιο 1**



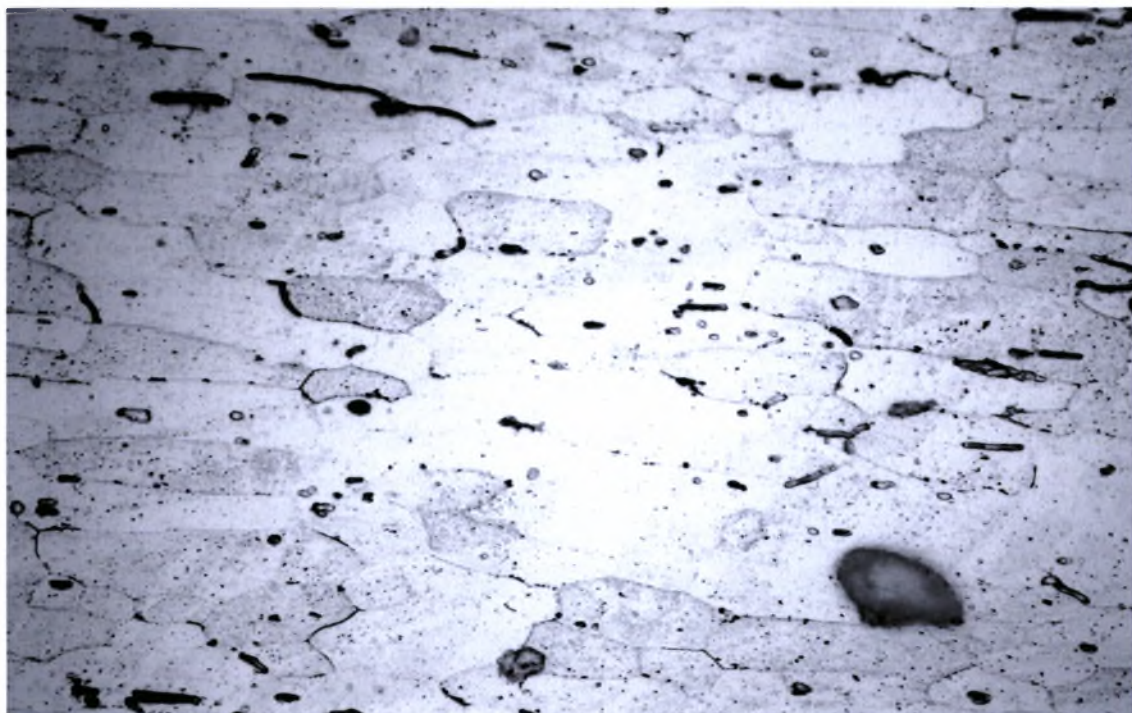
**Σχήμα B1.** Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του πρώτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.



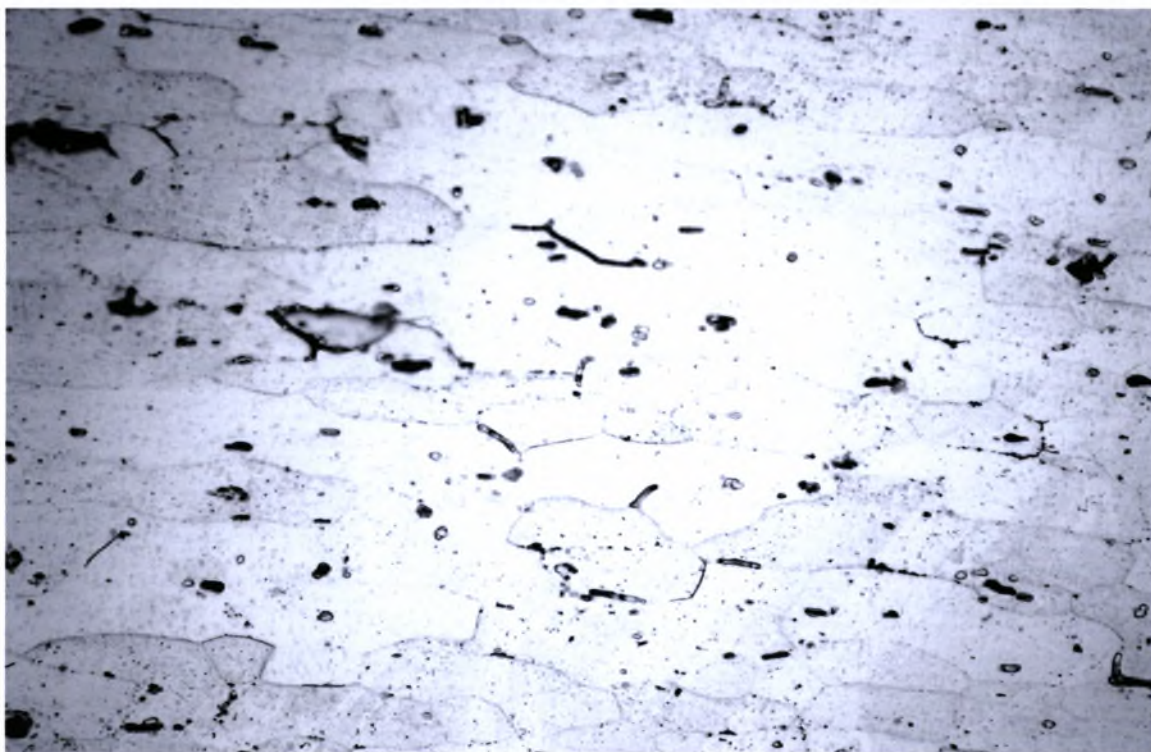
**Σχήμα B2.** Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του πρώτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.



## Δοκίμιο 2

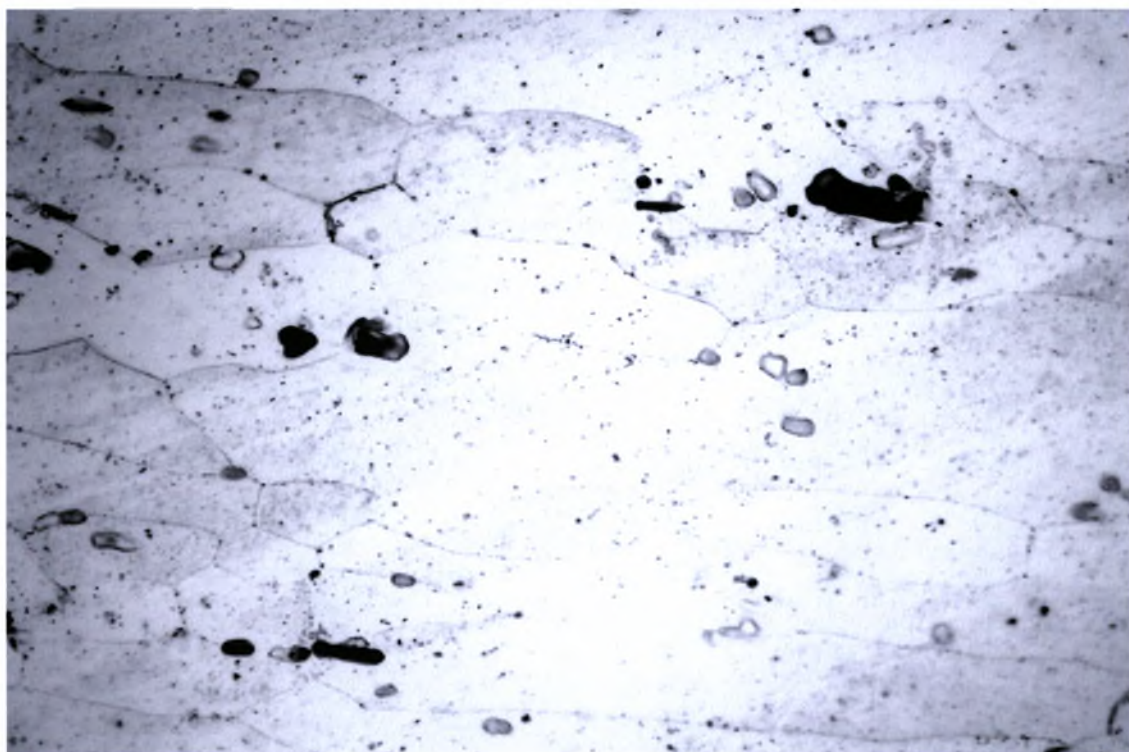


**Σχήμα Β3.** Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.

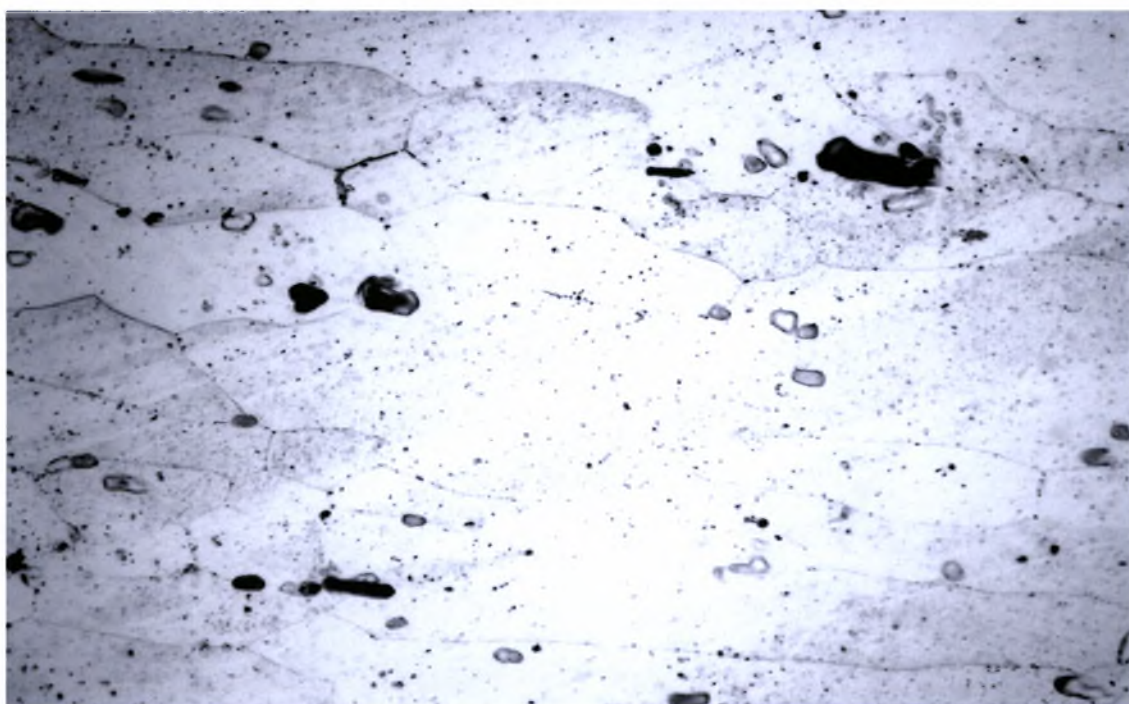


**Σχήμα Β4.** Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.





**Σχήμα Β5.** Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 1000x.



**Σχήμα Β6.** Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του δευτέρου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 1000x.



### Δοκίμιο 3

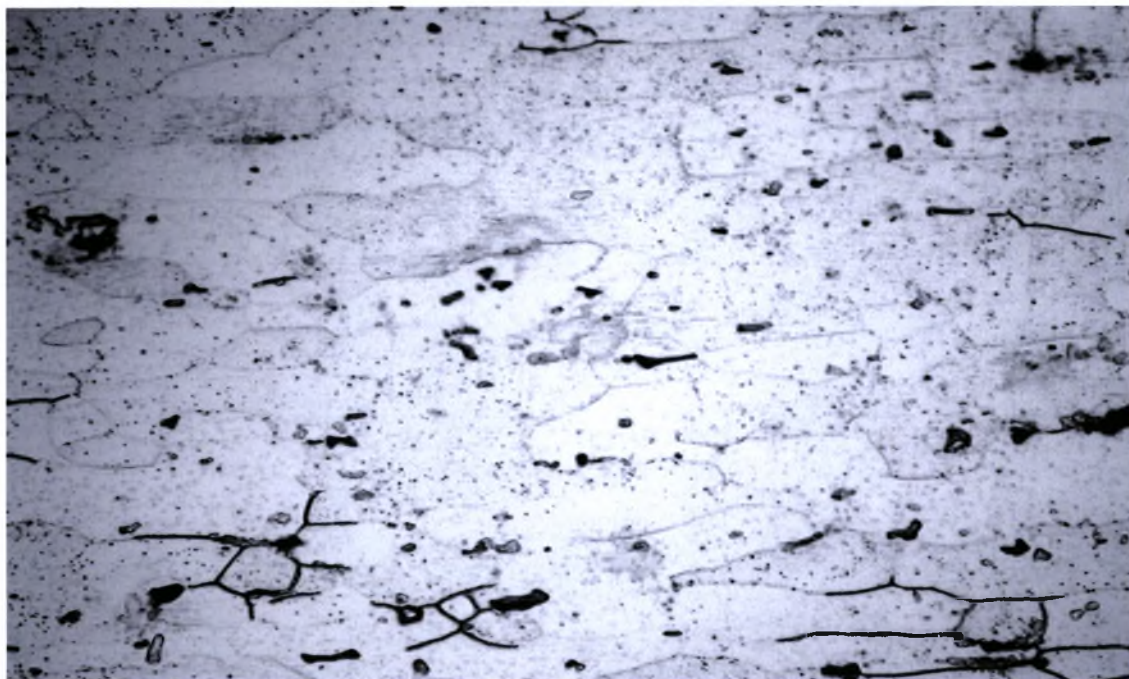


**Σχήμα Β7.** Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.

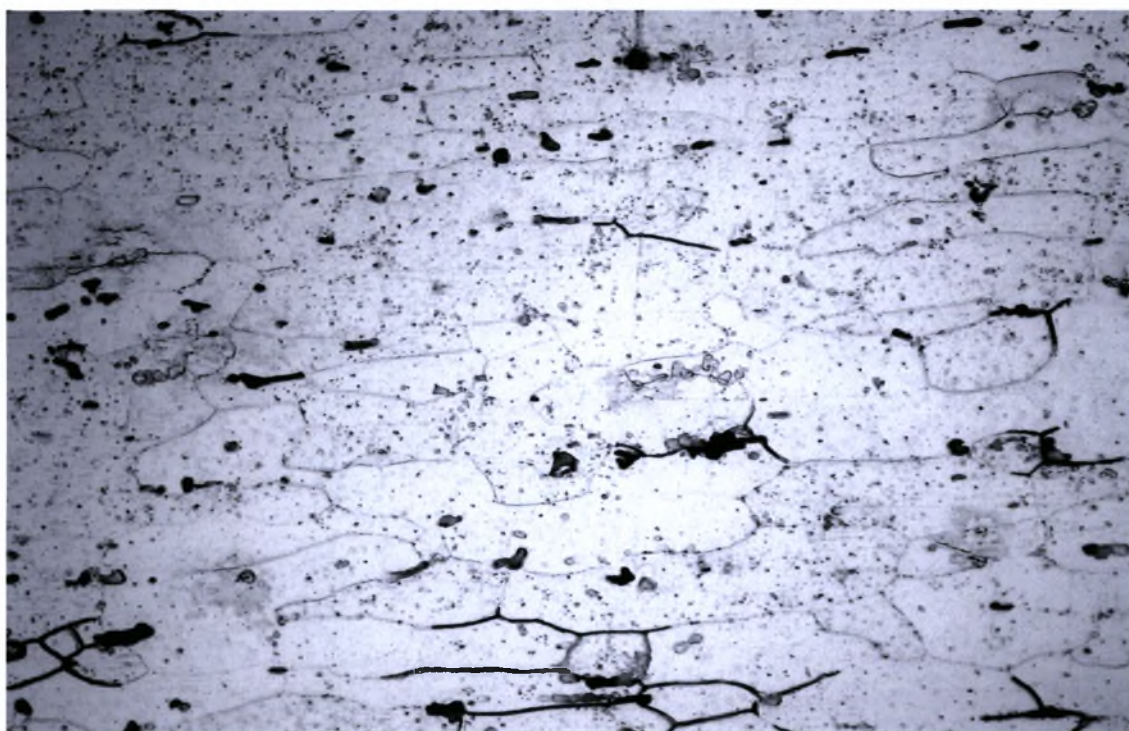


**Σχήμα Β8.** Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 200x.

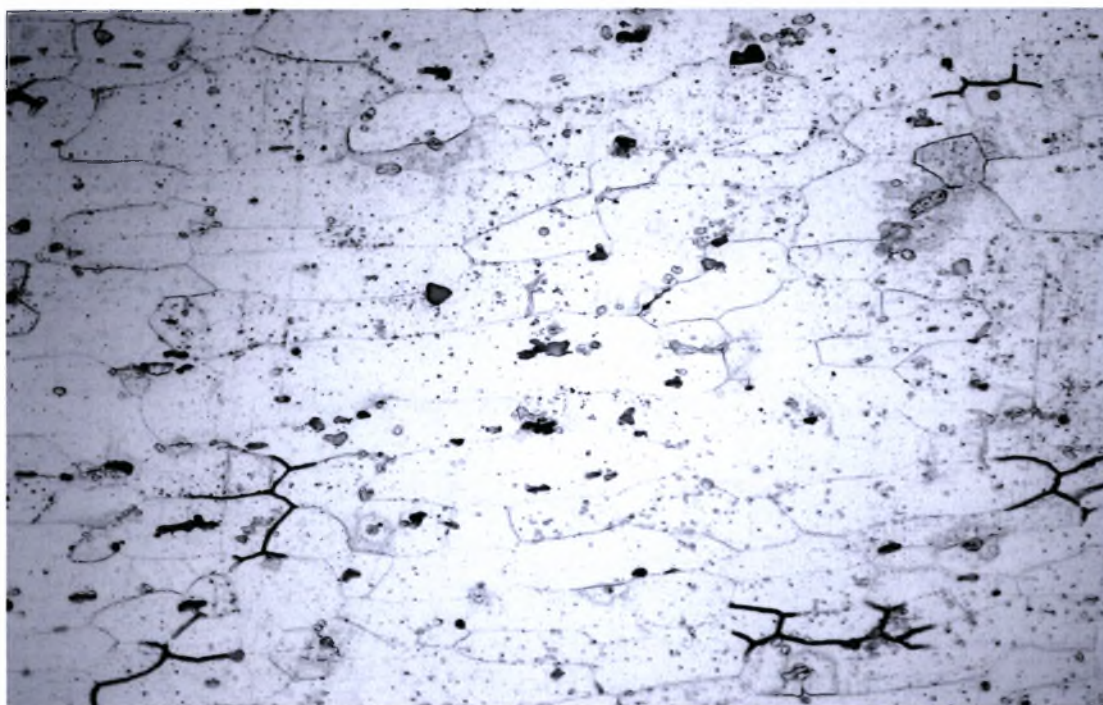




**Σχήμα B9.** Φωτογραφία1 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.



**Σχήμα B10.** Φωτογραφία2 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.



**Σχήμα B11.** Φωτογραφία3 κατά τη μεταλλογραφία του τρίτου δοκιμίου κράματος 6061 με μεγέθυνση 500x.

**Σημείωση:** Δεν παρουσιάζονται όλες οι φωτογραφίες που παρελήφθησαν για την κοκκομετρία, παρά μόνο 2-3 για κάθε μεγέθυνση-κάθε δοκιμίου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] H.R.Shercliff & M.F.Ashby, *A process model for age hardening of aluminium alloys- I. The model*, Acta Metallurgica et materialia, Volume 38, issue 10, pages 1789-1802, 1990

[2] H.R.Shercliff & M.F.Ashby, *A process model for age hardening of aluminium alloys-II. Applications of the model*, Acta Metallurgica et materialia, Volume 39, issue 10, pages 1803-1812, 1990

[3] Γρηγόριος Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007

[4]Helen Kamoutsi, *Corrosion-induced Hydrogen Embrittlement in High-Strength Al Alloys*, Volos, June 2004

[5] *Alouminum Alloys*, ASM Specialty Handbook, Materials park, Ohio, 1996

[6] J.R.Davis, *Alloying. Understanding the basics*, ASM International, 2001

[7] *Materials science and engineering*

[8] R.A.Swalin, *Thermodynamics of solids*, Wiley, New York,1962

[9] Κων/νος Παπαδάκης, *Εισαγωγή στο Mathematica*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003

## **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- <http://el.wikipedia.org>
- [www.bep.gr](http://www.bep.gr)
- [www.hellascams.gr](http://www.hellascams.gr)





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091653